

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут (факультет) Біотехнології та екологічного контролю
Кафедра Екологічної безпеки та охорони праці**

«До захисту в ЕК»
Директор інституту (декан факультету)
Наталія ГРЕГІРЧАК

(підпис) (ім'я та прізвище)
«07» лютого 2023 р.

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Ігор ЯКИМЕНКО

(підпис) (ім'я та прізвище)
«07» лютого 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 101 «Екологія»
(код та назва спеціальності)
освітньо-професійної програми «Екологія та охорона навколишнього
середовища»
на тему: «Використання біопалива для часткового заміщення викопного
палива на ТЕС потужністю до 300 МВт»

Виконав: здобувач II курсу, групи ЗМ

Федорук Валерія Володимирівна
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник Якименко Ігор Леонідович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

_____ (ім'я та прізвище) (підпис)

_____ (ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент Салюк А.І.
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Біотехнології та екологічного контролю

Кафедра Екологічної безпеки та охорони праці

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 101 «Екологія»

(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Екологія та охорона навколишнього середовища»

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри проф. Якименко І.Л.

“ 01 ” листопада 2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Федорук Валерії Володимирівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Використання біопалива для часткового заміщення викопного палива на ТЕС потужністю до 300 МВт

керівник роботи проф. Якименко І.Л.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “31” жовтня 2022 року №780кс

2. Строк подання здобувачем роботи 02 лютого 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи дані про запаси вугілля в Україні та світі, роботу електростанцій на вугіллі, негативний вплив вугільних ТЕС на навколишнє середовище, роботу установок для сумісного спалювання вугілля та твердого біопалива, розрахунки викидів пилу, SO₂, NO_x та CO₂.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Проблема використання вугілля на ТЕС, Біопаливо як заміна вугіллю, спільне спалювання вугілля та біопалива, розрахунок викидів від спільного спалювання вугілля та біопалива.

5. Перелік графічного матеріалу

-

АНОТАЦІЯ

Федорук В.В. Використання біопалива для часткового заміщення викопного палива на ТЕС потужністю до 300 МВт – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 101 «Екологія» (ОПП «Екологія та охорона навколишнього середовища»). – Національний університет харчових технологій МОН України, Київ, 2023.

В магістерській роботі проаналізовано стан вугільної промисловості в Україні та світі, а також стан виробництва та використання біопалива. Наведено методи сумісного спалювання вугілля та біопалива. Проведено розрахунок щодо зміни кількості викидів SO_2 , NO_x , CO_2 , а також твердих часточок пилу, у чотирьох випадках: при спалюванні вугілля, при спалюванні вугілля та встановленні очисного обладнання, при спалюванні вугілля та заміщенні його на 10% біомасою, при спалюванні вугілля та заміщенні його на 10% біомасою та встановленні очисного обладнання. В результаті додавання біомаси відбувається зменшення викидів твердих часточок а також викидів SO_2 , NO_x та CO_2 .

Наукова новизна:

1. Розраховано зміну кількості викидів від спалювальної установки ТЕС потужністю до 300 МВт у таких випадках: при спалюванні кам'яного вугілля, при спалюванні вугілля та встановленні очисного обладнання, при спалюванні вугілля з додаванням 10% біомаси, при спалюванні вугілля та додаванні 10% біомаси та встановленні очисного обладнання.
2. З розрахунку виявлено, що додавання твердого біопалива призводить до зменшення викиду твердих часточок та викидів SO_2 , NO_x та CO_2 , а також сповільнює зношуваність очисного обладнання (селективне каталітичне відновлення з рециркуляцією димових газів та сіркоочисна установка) за його наявності.

Практичне значення. Отримані розрахунки кількості викидів при сумісному спалюванні кам'яного вугілля та біомаси можуть бути використано для подальшого дослідження можливості впровадження спільного спалювання

Ключові слова: ТЕС, КАМ'ЯНЕ ВУГІЛЛЯ, ТВЕРДЕ БІОПАЛИВО, СПІЛЬНЕ СПАЛЮВАННЯ.

Список публікацій здобувача

1. Федорук; В.В. Перспектива використання деревини у якості біопалива на українських ТЕС *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Європейські Виміри Сталого Розвитку», 20-21 жовтня 2022.* – К.: НУХТ, 2022, с 90.

ANNOTATION

Fedoruk V.V. The use of biofuel for partial replacement of fossil fuels at TPPs with a capacity of up to 300 MW - Qualifying scientific work with manuscript rights.

Qualification work for obtaining a master's degree in the specialty 101 "Ecology" (EPP "Ecology and Environmental Protection"). - National University of Food Technologies of the Ministry of Education and Culture of Ukraine, Kyiv, 2023.

The master's work analyzed the state of the coal industry in Ukraine and the world, as well as the state of biofuel production and use. The methods of combined burning of coal and biofuel are given. A calculation was made regarding the change in the amount of emissions of SO_2 , NO_x , CO_2 , as well as solid dust particles, in four cases: when burning coal, when burning coal and installing cleaning equipment, when burning coal and replacing it by 10% with biomass, when burning coal and replacing its 10% biomass and installation of cleaning equipment. As a result of the addition of biomass, there is a reduction in emissions of solid particles, as well as emissions of SO_2 , NO_x and CO_2 .

Scientific novelty:

1. The change in the amount of emissions from a TPP combustion plant with a capacity of up to 300 MW in the following cases: when burning hard coal, when burning coal and installing cleaning equipment, when burning coal with the addition of 10% wood pellets, when burning coal and adding 10% of wood pellets and installing cleaning equipment.

2. From the calculation, it was found that the addition of solid biofuel leads to a decrease in the emission of solid particles and emissions of SO_2 , NO_x and CO_2 , and also slows down the wear and tear of the cleaning equipment (selective catalytic reduction with recirculation of flue gases and a desulfurization unit) if it is present.

Practical meaning. The obtained calculations of the amount of emissions during the co-combustion of hard coal and biomass can be used for further research into the possibility of implementing co-combustion.

Keywords: TPP, STONE COAL, SOLID BIOFUEL, COMBUSTION.

List of publications

1. Fedoruk; V.V. The prospect of using wood as biofuel at Ukrainian TPPs. *Proceedings of the IV International Conference on European Dimensions of Sustainable Development*, October 20-21, 2022. – Kyiv: NUFT, 2022, 90 p.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМА ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ НА ТЕС.....	13
1.1 Запаси вугілля в Україні та світі.....	13
1.2 Вугільні ТЕС та їх вплив на навколишнє середовище.....	15
1.3 Тверде біопаливо як заміна вугіллю.....	20
1.4 Спільне спалювання вугілля та біопалива.....	31
1.5 Методи очищення викидів ТЕС та використання вторинної сировини.....	41
1.5.1 Методи очистки викидів ТЕС.....	41
1.5.2. Використання вугільних відходів як вторинної сировини.....	44
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	49
2.1 Методи досліджень.....	49
2.2 Дані для розрахунку.....	61
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	63
3.1 Основний розрахунок.....	63
3.2 Обробка результатів розрахунків.....	68
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітрова електростанція

ГДК – гранично допустима концентрація

ГДС – гранично допустимий скид

ГЕС - гідроелектростанція

ККД – коефіцієнт корисної дії

ОВБСН – обрізки та викорчування багаторічних сільськогосподарських насаджень

ОПП – освітньо-професійна програма

ССВБ – спільне спалювання вугілля та біомаси

ТЕС – теплова електростанція

ТЕЦ – теплова електроцентраль

ВСТУП

Теплові електростанції є один із провідних видів з секторі виробництва електроенергії. На даний момент на них припадає більша частина виробленої енергії в Україні. Робота ТЕС супроводжується великою кількістю викидів, що зумовлює негативних вплив на навколишнє середовище.

Актуальність дослідження. Теплові електростанції є одними з ключових підприємств в енергетиці не тільки України, а й світу. Ефективність роботи теплових електростанцій напряму залежить від якості та характеристик встановленого обладнання а також від характеристик видів палива, що на них використовуються. Однак, в результаті роботи ТЕС виділяється велика кількість викидів, як забруднюють повітря.

Українські ТЕС наразі є одними з лідерів в Європі по кількості викидів від роботи великих спалювальних установок. Це вказує на те, що пошук рішень щодо зменшення кількості викидів від теплових електростанцій є актуальним, зокрема метод зменшення кількості викидів шляхом заміщення викопного вугілля біопаливом.

Мета роботи полягає у розрахунку зменшення викидів від спалювальної установки при додавання біопалива до кам'яного вугілля при сумісному спалюванні на теплових електростанціях.

Досягнення мети дослідження потребує виконання таких завдань:

1. Розглянути загальну ситуацію щодо залишків викопного палива в Україні та світі;
2. Розглянути принцип роботи ТЕС та оцінити їх вплив на навколишнє середовище;
3. Дослідити та знайти оптимальний вид біопалива для часткового заміщення вугілля;
4. Розрахувати потенціальне зменшення кількості викидів від великих спалювальних установок при введені біопалива як додатку до основного виду палива у розмірі 10%.

5. Оформити висновки та рекомендації щодо результатів розрахунку.

Об'єктом дослідження установки для спалювання на ТЕС потужністю до 300 МВт

Предметом дослідження є спільне спалювання кам'яного вугілля та твердого біопалива.

Наукова новизна:

1. Розраховано зміну кількості викидів від установки для спалювання на ТЕС потужністю до 300 МВт у таких випадках: при спалюванні кам'яного вугілля, при спалюванні вугілля та встановленні очисного обладнання, при спалюванні вугілля з додаванням 10% біомаси, при спалюванні вугілля та додаванні 10% біомаси та встановленні очисного обладнання.
2. З розрахунку виявлено, що додавання твердого біопалива призводить до зменшення викиду твердих часточок та викидів SO_2 , NO_x та CO_2 , а також сповільнює зношуваність очисного обладнання (селективне каталітичне відновлення з рециркуляцією димових газів та сіркоочисна установка) за його наявності.

Практичне значення. Розрахунки кількості викидів при сумісному спалюванні кам'яного вугілля та біомаси можуть бути використано для подальшого дослідження можливості впровадження спільного спалювання.

Особистий внесок здобувача.

1. Кваліфікаційна робота виконана здобувачем. Здійснено збір загальної інформації щодо теми дослідження з літературних та інтернет-джерел.
2. Збір даних для дослідження а також саме дослідження проведено на базі Інституту загальної енергетики НАН України під керівництвом канд. тех. наук Нечаєвої Т.П.
3. Складання плану написання кваліфікаційної роботи, ухвалення структури та використовуваної інформації здійснюється за керівництва професора, д.б.н. Якименко І.Л.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи: робота складається зі вступу, двох розділів, висновки та списку використаних джерел із 25 найменувань. Роботу викладено на 72 сторінках друкованого тексту, ілюстровано 10 рисунками та 20 таблицями.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМА ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ НА ТЕС

1.1 Запаси вугілля в Україні та світі

Теплові електростанції на вугіллі наразі займають більшу частину енергетичної промисловості світу. Близько 62% усієї світової електроенергії виробляється на ТЕС. До країн, у яких більшість виробленої електроенергії припадає саме на теплові електростанції належать США, Китай, Японія, Польща, Південна Африка, Австралія, Казахстан. Найбільшими споживачами, у свою чергу є Китай, США, Індія, Японія, Росія (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Найбільші споживачі електроенергії у світі (ТВт/год)²¹

Країна	Показник
Китай	6167
Сполучені штати Америки	3971
Індія	1243
Японія	1020
Росія	929
Південна Корея	563
Канада	529
Німеччина	529
Бразилія	524
Франція	441
Великобританія	307

Загальне число вугільних басейнів світу досягає декількох сотень. Найбільші з них наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Найбільші вугільні басейни світу (за запасами вугілля)¹⁷

Назва вугільного басейну	Країна	Запаси вугілля
Аппалацький	США	до 1,6 млрд т
Пенсильванський	США	17.5 млрд т
Сіднейський	Австралія	до 100 млрд т
Карагандинський	Казахстан	до 32 млрд т
Верхньо-Сілезький	Польща	100 млрд т
Рурський	Німеччина	210 млрд т

Україна займає високе місце щодо запасів викопних видів палива. Так, за запасами вугілля Україна перебуває на 8 місці зі списку 38 країн, а по природньому газу – на 23 серед 102 країн.

В Україні, за даними 2021 року, 25,6% електроенергії залежить від ТЕС. За даними ресурсу EnergyMap³⁾ кількість електроенергії, що виробляється на українських ТЕС за останні роки збільшилась від 2094,562 млн кВт/год (2017 рік) до 11442,39421 млн кВт/год (2021) рік (рисунок 1.1).

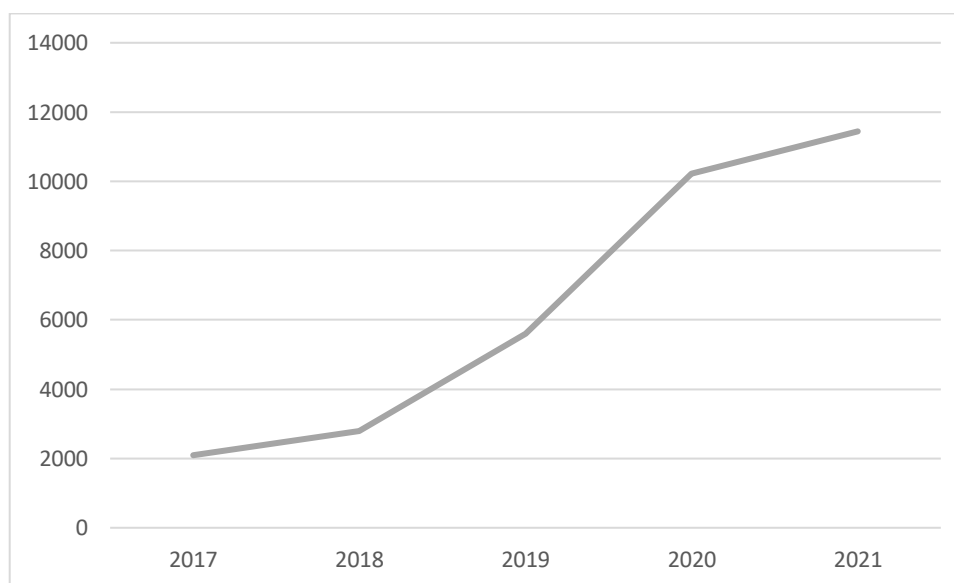


Рисунок 1.1 – Виробництво електроенергії на ТЕС України (млн кВт*год/рік)¹³

Більшість теплових електростанцій потребують для своєї роботи використання викопних видів палива, таких як газ та кам'яне вугілля. Вони є самими енергоефективними видами палива та прості в експлуатації. Однак, запаси такого палива не є невичерпними. За даними ресурсу EnergyMap, за останні п'ять років, запаси вугілля скоротились від 401477,8 (2017 рік) до 400699,3 (2021 рік) (рисунок 1.2).

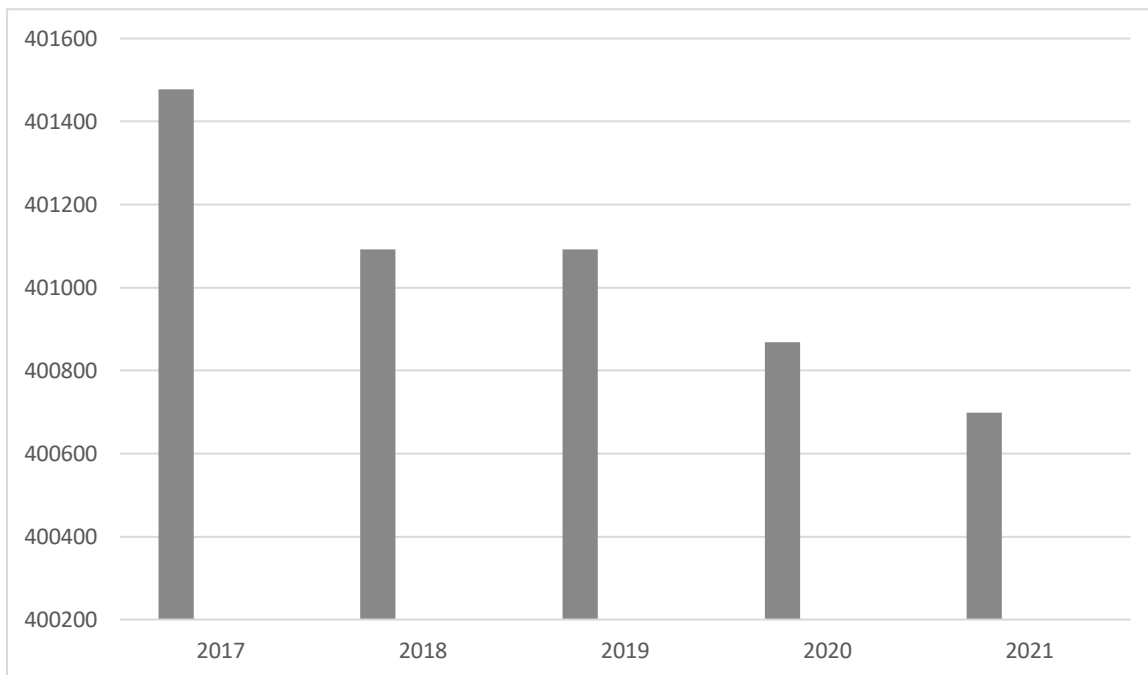


Рисунок 1.2 – Запаси вугілля України (млн тис тон)¹³

1.2 Вугільні ТЕС та їх вплив на навколишнє середовище

Для вирішення проблеми спалювання викопного палива, перш за все, потрібно розуміти принцип роботи теплових електростанцій.

Принцип роботи ТЕС полягає у перетворенні теплової енергії на електроенергію. Під час спалювання енергоносіїв на ТЕС нагрівається котел з водою. Пара, що виробляється при нагрівання, обертає турбіну, механічна енергія обертання якої переходить в електричну. ТЕС може ефективно працювати лише у безперервному

режимі. У разі її зупинки котли знову потрібно прогрівати протягом 2-3 діб для досягнення необхідних технічних параметрів пари¹.

Вугілля із залізничних вагонів поступає у розвантажувальні пристрої, звідки за допомогою стрічкових транспортерів відправляється на склад. Зі складу пальне подається в дробильну установку. Далі вугілля поступає в бункер сирого вугілля, а звідти у пиловугільний млин. Вугільний пил пневматично транспортується через сепаратор і циклон в бункер для вугільного пилу а звідти, за допомогою блоку живлення до горілок. Повітря з циклону всмоктується млиновим вентилятором і подається в топкову камеру котла.

Гази, що утворюються при горінні в топковій камері, після виходу із неї, проходять послідовно газоходи котельної установки, де у пароперегрівачі і водяному економайзері віддають тепло робочому тілу, а у повітренагрівачі - повітрю, що подається до котла. Потім у золоуловлювачі гази очищуються від летючої золи і через трубу димоходу всмоктувачами диму викидається в атмосферу.

Шлам і зола, що випадають із топкової камери, повітренагрівачем та золоуловлювачем змиваються водою і по трубах поступають до багерного насоса який перекачує їх на склад золи.

Повітря, що необхідне для горіння, подається в повітренагрівач першого котла дуйним вентилятором. Повітря забирається, зазвичай, із верхньої частини котельні та/або ззовні котельного відділення.

Конденсат із конденсатора турбіни подається конденсаторними насосами у ренегеративні нагрівачі низького тиску та деаерато, а звідти живильними насосами через нагрівач високого тиску в економайзер котла.

Втрати пару та конденсату компенсують хімічно обезсоленою водою, яка подається в лінію конденсату за конденсатором турбіни.

Охолоджена вода подається в конденсатор з приймального колодязя водопостачання циркуляційними насосами. Підігріта вода скидається в скидний

колодязь того ж джерела на деякій відстані від місця забору, достатньому для того, щоб нагріта вода не змішувалась із тою, що забирається. Установки для хімічної обробки додаткової води знаходяться в хімічному цеху.

Основне устаткування теплових електростанцій:

1. Парові котли

На теплових електростанціях можуть використовуватись багато видів парових котлів. Кожен із них має свої технічні та енергетичні переваги та недоліки. Однак основні елементи у всіх однакові, це топка котла та теплообмінні поверхні.

Парові котли мають декілька класифікацій. Так, за типом топки, котли бувають з шаровою топкою, вихровою топкою, камерною топкою, топкою з киплячим шаром, та специфічними топками, які використовують для спалювання специфічних видів палива; за видом палива: котли для спалювання твердого, рідкого та газоподібного палива, а також побутові відходи, біомасу та дрова;

За способом організації взаємного руху продуктів згоряння та робочого тіла, котли бувають газотрубні та водотрубні. Водотрубні котли, у свою чергу, поділяються на барабанні з природною або примусовою циркуляцією та прямоточні.

У котлах з природною циркуляцією води, рідина з барабану опускається по опускних трубах (тих, що не обігріваються), до нижніх збірних колекторів, а потім. Разом із парою, що утворилась, підіймається по підйомних трубах (трубах, що обігріваються).

У випадку з котлами з примусовою циркуляцією, ті самі процеси здійснюються за допомогою спеціального насосу.

У всіх парових котлах тепло передається від продуктів спалювання через поверхню нагріву, воді та парі.

Поверхні нагріву поділяються:

- Залежно від процесів які в них протікають: випарні, нагрівальні та пароперегрівні;
- Залежно від способу передачі теплоти: радіаційні, конвективні, радіаційно-конвективні².

2. Котельні установки

Окрім парового котла, котельна установка також включає паливний тракт, пароводяний тракт та газоповітряний тракт.

До паливного тракту відносять установки та устаткування для подачі і підготовки сирого палива до спалювання. Сюди відносять дробарки, бункер, сепаратори, транспортери та пиловловлювачі.

До пароводяного тракту належить система устаткування, яка проганяє воду, пароводяну суміш та перегріту пару: економайзер, топкові екрани та пароперегрівники.

Газоповітряний тракт включає у себе газовий та повітряний тракти.

Повітряний тракт включає устаткування для відбору повітря та його подачі до топки котла: дуттьові вентилятори, короби холодного та гарячого повітря, повітряпідігрівники та пальникові пристрої.

Газовий – установки, по яких здійснюється рух продуктів згоряння до виходу у атмосферу: топка та конвективна шахта котла, золоуловлювачі, димососи, димова труба.

У таблиці наведено приблизні потужності парового котла для забезпечення парою турбіни потужністю 300 МВт.

Таблиця 1.3 – Показники парового котла для забезпечення потужності турбіни до 300 МВт².

Показник та одиниця вимірювання	Значення
Потужність, МВт	300

Закінчення таблиці 1.3

Показник та одиниця вимірювання	Значення
Виробництво пари, <i>m/год</i>	1200
Температура пари, °C	540-570
Втитрата вугілля, <i>m/год</i>	130

Вплив ТЕС на навколишнє середовище

Відповідно до вимог документу про Європейський реєстр викидів і переміщення забруднювачів а також Директиви щодо спалювальних установок великої потужності, країни Європи щорічно надають звіти про викиди SO_2 , NO_x та викидів твердих часточок кожною електростанцією. Україна очолює ТОП-3 цих рейтингів майже за всіма показниками, враховуючи навіть те, що збір даних щодо викидів на територіях ведення бойових дій а також на тимчасово окупованих територіях наразі неможливий.

За даними с звітів компанії EMBER¹², Україна є лідером за кількістю викидів SO_2 (27% від загальних викидів Європейських країн). Найбільшим забрудником вважається Бурштинська ТЕС; також нашій країні належить дев'ять із тридцяти вугільних ТЕС, які викидають найбільш оксидів азоту в атмосферу. Також у Україні розташовується 8 з 10 ТЕС з найбільшими показниками викидів твердих часточок від спалювання твердого викопного палива.

В Україні 34% споживання електроенергії покривають 20 ТЕС, збудованих до 1976 року, на жодній яких не встановлено оснащення для десульфіризації викидів.

Унаслідок спалювання вугілля утворюється велика кількість зольних та шлакових відходів. Зола і шлак є великотоннажними відходами. На 10 т вугілля припадає приблизно 1 т зольношлакових відходів, або близько 3-40% від маси вугілля (залежно від складу вугілля). Хімічний склад зольношлакових відходів наведено у таблиці 1.4. Склад може коливатися в залежності від збагачуваності та місця родовища вугілля .

Таблиця 1.4 – Хімічний склад зольношлакових відходів²⁰

Назва	Кількість, %
Діоксид кремнію (SiO_2)	37-63
Оксид алюмінію (Al_2O_3)	9-37
Оксид феруму (Fe_2O_3)	4-17
Оксид кальцію (CaO)	1-32
Оксид магнію (MgO)	0,1-5
Триокис сірки (SO_3)	0,05-2,5

Також у золі присутнє незгоріле паливо від 6-7 % до 25 %. У шлаках, як правило, воно відсутнє. У незначній кількості наявні такі елементи, як титан, калій та натрій. У деякому вугіллі зустрічаються навіть дорогоцінні метали: срібло, золото, платина, рідкі та розсіяні елементи.

Відповідно до вимог Водного кодексу України¹⁰, скидання стічних вод у водні об'єкти дозволяється лише за умови наявності нормативів ГДС та ГДК забруднюючих речовин. Також, у водні об'єкти не можна скидати стічні води, що можуть призвести до підвищення температури водного об'єкта більш ніж на 3 °С порівняно з його природною температурою у літній період.

Для ТЕС це є проблемою, адже на теплових електростанціях утворюється велика кількість теплих стічних вод, які потрібно охолоджувати перед скиданням, щоб запобігти евтрофікації водойми та вимирання живих організмів в ній.

1.3 Тверде біопаливо як заміна вугіллю

Біопаливо або біологічне паливо — органічні матеріали, як-от деревина, відходи та спирти, які використовуються для виробництва енергії. Це — відновлюване джерело енергії, на відміну від інших природних ресурсів, таких як нафта, вугілля й ядерне паливо. Офіційне визначення біопалива — будь-яке паливо, яке містить (за об'ємом) не менш ніж 80 % матеріалів, отриманих від живих організмів, зібраних в межах десяти років перед виробництвом¹⁶.

Біопаливо може бути тверде, рідке та газоподібне.

До твердого біопалива відноситься традиційні дрова (часто у вигляді відходів деревообробки) і паливні гранули (пресовані дрібні залишки деревообробки).

Рідке паливо — це спирти (метанол, етанол, бутанол), ефіри, біодизель та біомазут.

Газоподібне паливо — різні газові суміші з чадним газом, метаном, воднем, які отримуються внаслідок термічного розкладання сировини у присутності кисню (газифікація), без кисню (піроліз) або при зброджуванні під впливом бактерій.

Залежно від вихідного матеріалу, що використовується для виробництва, біопаливо розділяють на декілька груп:

Перша група – біопаливо, яке отримують, використовуючи традиційні технології з рослинних і тваринних жирів, а також крохмалю і цукру. Це найперші та найрозповсюдженіші способи отримання біопалива.

Друга група – біопаливо, для виробництва якого використовується біомаса. Вона може складатись з нехарчових або залишкових частин рослин: лушпиння, листя, стебла, а також деревна стружка, м'якоть овочів і фруктів, що залишається після віджимання соку, тощо. Сучасні технології дозволяють отримати корисну сировину з волокнистої або деревної біомаси, в яких міститься лігнін або цукор, з яких надалі отримують біопаливо. Це більш новий спосіб отримання біопалива, який дозволяє використовувати відходи багатьох видів промисловості у якості сировини для виробництва біопалива.

Третя група – перспективна технологія, що дозволяє отримувати дешеве біопаливо після переробки водоростей. З одного гектара водоростей можна отримати в 30 разів більше енергії, ніж з гектара сої. Цей метод наразі є найновішим .

У якості альтернативи вугіллю, на ТЕС і ТЕЦ можуть використовуватись тверді та газоподібні види палива.

Газоподібне біопаливо (біогаз) є одним із самих поширених видів біопалива. У якості сировини для отримання біогазу можуть використовуватись рослинна біомаса та/або органічні відходи.

Біомаса – це поновлюване джерело енергії, органічний матеріал, до складу якого можуть входити частини з рослин, мікроорганізмів і тварин: трав'янисті рослини, дерево, зернові культури, морські рослини, водорості, стічні води, гній, тощо.

Біомаса може бути конвертована (перетворена) в різні види біопалива або енергії декількома способами:

Термохімічне перетворення – отримання теплової та електроенергії енергії шляхом спалювання біомаси. Найчастіше для цього використовують тверде біопаливо – дерево і деревні гранули, відходи деревообробки, пелети, одержувані з тирси, лузги насіння, соломи, шкаралупи горіхів .

Біотехнологічна конверсія – розкладання біомаси у метантенках - це циліндричний резервуар із конічним дном, у якому здійснюється підігрівання суміші - , для виділення з неї суміші горючих газів з великою часткою метану (до 70%). Метантенк допомагає пришвидшити цей процес, оскільки у природному середовищі він займає доволі багато часу.

В даний час в світі розроблено понад 60 різних технологій, що дозволяють отримувати біогаз шляхом переробки біомаси. Таку різноманітність можна пояснити тим, що для кожного виду вихідної сировини (відходи харчової промисловості і сільського господарства, харчові відходи, гній, стічні води, тощо) використовується свій тип переробки, щоб домогтися максимального виробництва біогазу.

Деревинну біомасу для цього можна отримувати із державних та комунальних лісових господарств, де вона залишається у вигляді відходів, а також залишки деревини від деревообробної промисловості (рис 1.3).

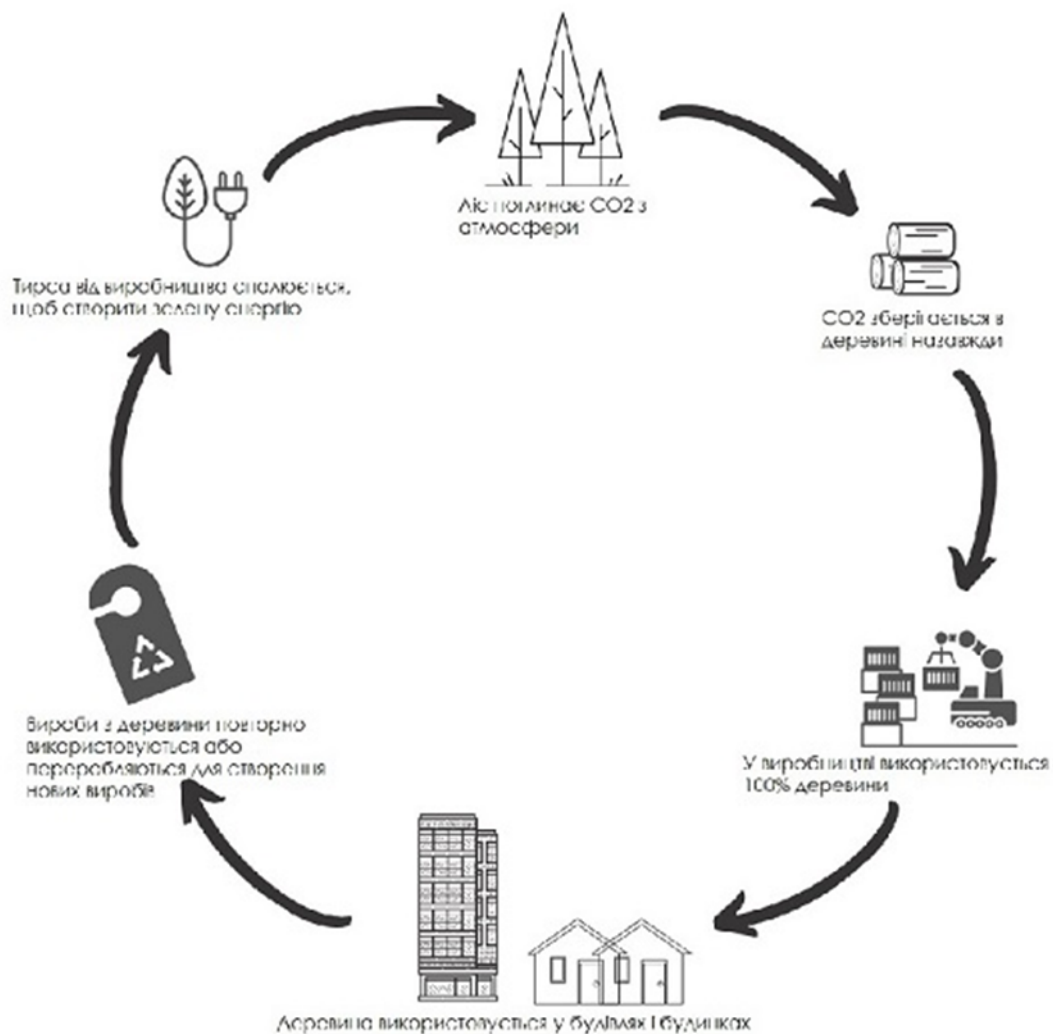


Рисунок 1.3 – Ланцюг поставок деревинної біомаси¹⁷

Таблиця 1.5 - Рівень вмісту негорючих елементів в паливі та золі біомаси⁸

Елементи	Деревна тріска та пелети	Солома
Зольність, %	1-2,5	3-8
Вміст в паливі, <i>мг/кг</i> (на суху масу)		
<i>Si</i>	440-2900	4200-27000
<i>Ca</i>	2900-7000	440-7000

Закінчення таблиці 1.5

Елементи	Деревна тріска та пелети	Солома
Вміст в паливі, мг/кг (на суху масу)		
<i>Mg</i>	310-800	100-3200
<i>K</i>	910-1500	320-21000
<i>Na</i>	20-110	56-4800
<i>P</i>	97-340	110-2900
Вміст в золі, мг/кг (на суху масу)		
<i>Si</i>	4-11	16-30
<i>Ca</i>	26-38	4,5-8,0
<i>Mg</i>	2,2-3,6	1,1-2,7
<i>K</i>	4,9-6,3	10-16
<i>Na</i>	0,3-0,5	0,2-1,0
<i>P</i>	0,8-1,9	0,2-6,7

Таблиця 1.6 - Хімічний склад та вихід летючих речовин різних видів біопалива, % на суху масу⁸

Елементи	Деревна тріска	Відходи деревини	Кора	Солома пшениці
<i>C</i>	47-51	42-51	48-51	30-47
<i>H</i>	5,7-63	5-8	4,6-6,2	3,9-6,3
<i>N</i>	0,1	0,1-3,9	0,1-0,6	0,3-1,3
<i>O</i>	38-45	34-47	38-42	23,8-49,3
<i>S</i>	0,1	0-0,1	0-0,2	0,1-0,5
<i>Cl₂</i>	0,0	0-0,4	0,0	0-3,3
Вихід летючих речовин	76-86	44-86	69-77	47-81

У структурі біопалива, що виробляються в ЄС, найбільша частка традиційно припадає на тверді біопалива – більше 70% (91,4 млн. т н.е./рік). На другій позиції знаходиться біогаз – 12% (15,6 млн. т н.е./рік). Для повного задоволення своїх потреб в енергії Євросоюз імпортує енергоносіїв практично у два рази більше, ніж виробляє – 1478 млн. т н.е./рік за даними (при цьому експорт – 576 млн. т н.е./рік, з яких 69% – нафтопродукти). Основними складовими імпорту енергоносіїв є нафтопродукти (63%), природний газ (23%) і вугілля (10%). Найкрупнішими імпортерами газу є Німеччина, Італія, Великобританія, Франція. Більше за всіх твердого і рідкого біопалива імпортують Великобританія, Італія, Данія, а серед великих експортерів є Нідерланди, Німеччина, Іспанія, Латвія ⁶.

Із загального обсягу біомаси та біопалива, що споживаються в ЄС (136,2 млн. т н.е./рік), найбільша частка (82,9 млн. т н.е./рік або 61%) використовується для виробництва теплової енергії. Решта ділиться приблизно порівно між виробництвом електроенергії і біопалива для транспорту. Найкрупнішими споживачами теплової енергії є населення (42,3 млн. т н.е./рік) і промисловість (21,4 млн. т н.е./рік). За даними 2015 р., цілі ЄС-28 на 2020 рік по частці біомаси у виробництві теплової енергії виконані вже на 92%, по електроенергії – на 77%, по моторним біопаливам – лише на 49%. Більша частина теплової енергії в ЄС виробляється в режимі ТЕЦ. Так, із загального обсягу біомаси, що споживається для виробництва теплової енергії, 72% припадає на ТЕЦ. З іншого боку, 58% загального обсягу виробництва електроенергії з біомаси в ЄС також отримується на ТЕЦ, а в деяких країнах (Данія, Литва, Латвія, Швеція) цей показник сягає 100%. Ці дані є явним підтвердженням пріоритетного розвитку комбінованого виробництва теплової і електричної енергії над роздільним виробництвом.

Лісове господарство є основним джерелом деревної біомаси в ЄС. Із загальної площі лісів (161 млн. га) близько 83% (134 млн. га) використовуються для заготівлі деревного палива. У деяких країнах (Німеччина, Великобританія, Словенія, Латвія) цей показник складає більше 90%. Середній по Євросоюзу рівень використання

(рубки) щорічного приросту деревини становить 63%, по окремих країнах: Австрія – 94%, Швеція, Литва – 80%, Словаччина – 79%, Чехія – 78%.

Євросоюз виробляє майже половину світового обсягу деревних пелет (14 млн. т/рік за даними 2016 р.) і ще близько 8 млн. т імпортує з Північної Америки та країн Європи поза ЄС. Із загального обсягу споживання пелет в ЄС (більше 24 млн. т/рік), 90% – це пелети з деревини, 10% – пелети з біомаси аграрного походження (соломи, лушпиння соняшника та ін.). Найбільша частина пелет з деревини (13,4 млн. т/рік) використовується для виробництва теплової енергії, у тому числі 9,2 млн. т/рік – у побутовому секторі.

Біопаливо вже почали широко застосовувати в країнах ЄС, та вже мають позитивні результати його використання. Так, наприклад, Данська компанія «Ørsted» встановила на своїх ТЕЦ системи спалювання біопалива із відходів харчової та деревообробної промисловості¹⁵. Також компанія розробила методи переробки ТПВ на енергію та продукти вторинного використання. Для цього компанія використовує анаеробні методи виробництва біогазу із органічних відходів сільськогосподарської діяльності а також ті, що відсортовані від побутових відходів .

Окрім «Ørsted», існує ще багато прикладів використання біопалива для виробництва енергії для ТЕС (таблиця 1.7)

Таблиця 1.7 - Кращі практики енергетичного використання біомаси ОБСН в країнах ЄС³.

Місце розташування та рік започаткування проекту	Вид та обсяг біомаси	Способи використання біомаси, перспективи розвитку	Капітальні витрати
Іспанія, м.Сокуельямос, 2011, (компанія “Pelets Combustible de la Mancha S.L.”)	Виноградна лоза, 20 тис. Т/рік, (пелети, тріска)	Комерційне виробництво пелет та тріски. Виконується пошук партнерів для будівництва ТЕС на біопаливі з виноградної лози.	5,8 млн. Євро (початкові інвестиції)

Закінчення таблиці 1.7

Місце розташування та рік започаткування проекту	Вид та обсяг біомаси	Способи використання біомаси, перспективи розвитку	Капітальні витрати
“Familia Torres” Іспанія, м.Вілафранка-дель-Пенедес, 2015 р.	Винорадна лоза, в середньому 225т/рік (подрібнена БМ)	Виробництво теплової енергії для потреб місцевого виноградного заводу (котел 130 кВт) та місцевої системи ЦТ (котел 500 кВт), Планується розширення кількості споживачів за рахунок інших винних заводів та приєднання нових об’єктів до системи ЦТ.	600 тис. євро
“Fiusis” Італія, м.Калімера, 2010 р.	БМ від обрізки насаджень оливкових дерев, 8 тис т/рік, (подрібнена БМ)	Виробництво електроенергії на ЕС 1 МВт (технологія ОЦР). Власник ЕС планує також виробництво пелет з обрізок оливкових дерев	8 млн. євро
Франція, Marlenberg (фермерське виноробне господарство), 2010 р.	БМ від обрізків та видалення виноградників, 12т/рік (тріска)	Виробництво теплової енергії для власних потреб господарства (котел 50 кВт). Планується частковий перехід з тріски на пелети, а також використання БМ від видалення виноградників	77,7 тис.євро (прес-підбирач для круглих тюків, стаціонарна дробарка, котел)

Біоенергетика є важливою частиною енергетичного сектору Європейського Союзу і найбільш вагомою складовою сегменту відновлюваної енергетики. ЄС достатньо успішно наближається до досягнення цілей поставлених Директивою 2009/28/ЄС²¹, при цьому принаймні десять країн вже перевиконали своє зобов’язання по частці ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії.

Традиційно, біомаса робить найбільший внесок до виробництва теплової енергії, її провідна роль серед інших відновлюваних джерел енергії в цьому секторі зберігатиметься і в майбутньому. Ситуація в Україні співпадає з цією тенденцією. Відмінність полягає в тому, що в ЄС більша частина теплоти отримується в режимі комбінованого виробництва з електроенергією, а в Україні приклади ТЕЦ на біомасі залишаються поки поодинокими. Також Україна суттєво відстає у виробництві електроенергії з біомаси у порівнянні з іншими ВДЕ. Так, в ЄС-28 біомаса займає третє місце по виробництву «зеленої» електроенергії (близько 18% загального обсягу електроенергії з ВДЕ) після ГЕС (40%) і ВЕС (30%) (дані 2017 р.)⁹. В Україні ж біопалива знаходяться на останньому місці серед усіх відновлювальних джерел енергії в цьому секторі – 3.2% загального обсягу виробництва «зеленої» електроенергії (за даними Енергетичного балансу України). Таким чином, для України можна рекомендувати пріоритетний розвиток комбінованого виробництва теплової і електричної енергії з біомаси і підвищення ролі біомаси у виробництві електроенергії у порівнянні з іншими відновлюваних джерел енергії.

Україна вже має гарні приклади використання біомаси. Так наприклад, завод виноградних вин «Шабо», що знаходиться в Одеській області, використовує виноградну лозу як біомасу для підігріву технічної води та забезпечення опалення у зимовий період (паровий котел потужністю 1,6 т пари/год). На заводі встановлено обладнання для підбирання і подрібнення виноградної лози. Також підприємство розглядає можливість розширення території заготівлі біомаси ОВБСН³.

Іще одним прикладом в Україні є побудована у 2021 році Житомирська ТЕЦ, яка працює на відходах деревообробної промисловості. Теплова електроцентраль має потужність до 1,2 *MВт* електричної та 7,1 *MВт* теплової енергії. Цього достатньо, щоб забезпечити теплом 73 багатоквартирні будинки. Проект було здійснено на підтримки Державного секретаріату Швейцарії з економічних питань. Ними на проект було виділено близько 10 млн франків. У планах ще є побудова чотирьох таких котелень та ТЕЦ, які будуть функціонувати, на біомасі та RDF- паливі (спалювання

відходів). Таким чином, міська влада планує скоротити використання містом витрат газу на 90-95%¹⁹.

Більше прикладів застосування біопалива в Україні наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Приклади використання біопалива в Україні

Назва, місцезнаходження	Тип електростанції	Потужність
Поліська ТЕС	Теплова електрична станція	5,8 мВт
Тернопільська станція	Біогазова електростанція	659 кВт
Сіверська ТЕЦ	Теплова електрична станція	12,5 мВт
Дніпропетровська біогазова установка	Біогазова електростанція	999 кВт
Херсонська електростанція	Біогазова електростанція	625 кВт
Білоцерківська електростанція	Біогазова електростанція	845 кВт
Полтавська електростанція	Біогазова електростанція	1003 кВт
Криворізька електростанція	Біогазова електростанція	1063 кВт
Харківська електростанція	Біогазова електростанція	1908 кВт

Закінчення таблиці 1.8

Назва, місцезнаходження	Тип електростанції	Потужність
Корюківська ТЕС	Теплова електрична станція	4000 кВт
Криворізька електростанція	Біогазова електростанція	1154 кВт

Україна має великий потенціал щодо використання біопалива, адже, як аграрна країна, має його у великому обсязі. Тільки за 2021 рік потенціал біомаси України оцінювався у 26,5 млрд м³/рік (таблиця 1.9).

Таблиця 1.9 - Потенціал різних видів біомаси в Україні станом на 2021 рік⁴.

Біомаса	Потенціал (млрд м ³ /рік)
Тваринні екскременти	2,4
Перелогові землі для вирощування енергетичний культур	17,8
Деревинна біомаса	2,5
Солома	3,3
Полігонний газ	0,35
Осад стічних вод	0,15
Разом	26,5

У зв'язку з критичним станом українських ТЕС через військову агресію з боку РФ, в Україні почали активно проектувати та вводити в експлуатацію нові енергетичні станції, що працюватимуть на біопаливі. У жовтні 2022 року було оголошено про будівництво ТЕС на біопаливі потужністю 90МВт у Львівській області. Її планують ввести в експлуатацію вже в лютому 2023 року²².

Серед інших прикладів масштабного використання альтернативних видів енергії, компанія ДТЕК «Західенерго» має приклади застосування альтернативних джерел енергії. Так, паралельно з Ладжинською ТЕС, під її керівництвом вже працює сонячна електростанція та гідро електростанція.

1.4 Спільне спалювання вугілля та біопалива

Відповідно до Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок, який було схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України 8 листопада 2017 року¹², Україна ставить за мету поступове скорочення викидів діоксиду сірки, оксидів азоту, а також речовин у вигляді суспензованих твердих частинок (пилу) на існуючих великих спалювальних установках, енергетичною потужністю 50 МВт і більше. Після завершення плану скорочення викидів, всі спалювальні установки повинні відповідати вимогам Директиви 2010/75/ЄС по викидах перерахованих вище забруднювальних речовин.

Директива 2010/75/ЄС або Директива про промислове забруднення²¹ прийнята 24 листопада 2010 року і базується на пропозиції Європейської Комісії про перегляд, оновлення та об'єднання семи раніше діючих директив, включаючи директиву про інтегроване запобігання та контроль забруднення, щодо великих спалювальних установок, щодо спалювання відходів, щодо викидів від розчинників та 3-х директив щодо регулювання діоксиду титану.

Для операторів, які експлуатують спалювальні установки, Національний план скорочення викидів встановлює обмеження річних граничних обсягів викидів щонайменш по одній із таких забруднюючих речовин: SO_2 , NO_x і пил.

Протягом строку дії Національного плану скорочення викидів оператори мають забезпечити поступове скорочення граничного обсягу викидів від усіх спалювальних установок, які включені до Національного плану скорочення викидів, та досягти нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин та інших вимог, викладених у Директиві 2010/75/ЄС, – до 31 грудня 2028 року для пилу і SO_2 та до 31 грудня 2033 року для NO_x . Після завершення строків дії Національного плану скорочення викидів оператори великих спалювальних установок мають дотримуватися граничних значень викидів відповідно до вимог Додатку V Директиви 2010/75/ЄС.

Сумісне спалювання (спільне використання) – це спалювання більш ніж одного виду палива для виробництва електроенергії. Спільне спалювання вугілля та біомаси забезпечує виробництво відновлюваної енергії з обмеженими капітальними витратами, використовуючи переваги високої електроефективності існуючих вугільних електростанцій. На сьогодні, при сумісного спалюванні, можливе використання біомаси, як другого виду палива, у кількості до 20-25% від загального об'єму спалюваного палива²¹.

Поглинання рослинами вуглекислого газу, при їхньому рості та розвитку, дозволяє створити нейтральний баланс CO_2 при спалюванні їх решток. Крім того, біомаса має менший вміст сірки та сполук металів, і завдяки особливій взаємодії між біомасою та вугіллям при спалюванні, частка викидів SO_2 значно зменшується, що є додатковою перевагою використання ССВБ.

У багатьох країнах існує проблема у вигляді відсутності можливості постачання біомаси на місцевому рівні. На сьогодні, більшість установок спільного спалювання ЄС імпортують велику кількість відходів біомаси із-за кордону. Наприклад, пелети з Канади та залишки оливкових дерев зі середземноморських країн. Але як видно з розділу 1.3, Україна має потенціал до розвитку біо електростанцій з використанням власних паливних ресурсів.

Методи використання біомаси для спільного спалювання:

1. Попереднє змішування вугілля та біомаси

Коли частка біопалива досить низька (до 5-10%), його можна подавати разом із вугіллям до вугільних млинів, а потім спалювати разом. Загалом, це найпростіший варіант, який потребує найменше вкладень. Однак, така система несе найвищий ризик несправності системи подачі палива. Попереднє змішування передбачає подальше спільне спалювання.

2. Спільне пряме додавання.

Другий варіант передбачає окреме подрібнення біомаси, та її дозоване додавання до подрібненого палива перед безпосередньо перед пальниками або у самому пальнику. Цей варіант вимагає встановлення низки транспортних труб для біопалива через передню частину котла, яка вже може бути перевантаженою. Також може виявитись складніше контролювати та підтримувати робочі характеристики пальника за нормою навантаження для котла. Пряме додавання пов'язане із прямим спільним спалюванням.

3. Окреме спалювання біомаси та вугілля

Цей варіант передбачає окрему обробку та подрібнення біопалива зі спалюванням у спеціальних спалювальних установках. Такий підхід являє собою варіант із найбільшими капітальними витратами, але передбачає найменший ризик для роботи котла. Цей метод пов'язаний з непрямим або паралельним спільним спалюванням.

4. Повторне спалювання біомаси у верхній топці котла.

Останній варіант передбачає використання біопалива як палива для повторного спалювання для контролю викидів нітрогеновмісних сполук. Тобто спалювання біопалива відбувається в спеціально розробленій системі повторного спалювання, розташованій у верхній топці котла. Ця система все ще знаходиться на стадії розробки, наразі проводяться перші випробування. Цей метод пов'язаний з непрямим або прямим спільним спалюванням.

Загальні схеми методів спалювання:

1. Пряме спільне спалювання

Пряме спалювання є найменш дорогим, найбільш простим і широко застосовуваним методом. Біомаса подається безпосередньо у топку котла після проходження через ті самі млини – дробарки та бункери, що і вугілля. Біомасу можна змішувати з вугіллям на паливному майданчику, або подавати у камеру

згоряння окремо. Багатопаливні котли з псевдозрідженим шаром досягають ККД понад 90%, а викиди димових газів нижчі, ніж при спалюванні зі звичайною решіткою, завдяки нижчим температурам згоряння.

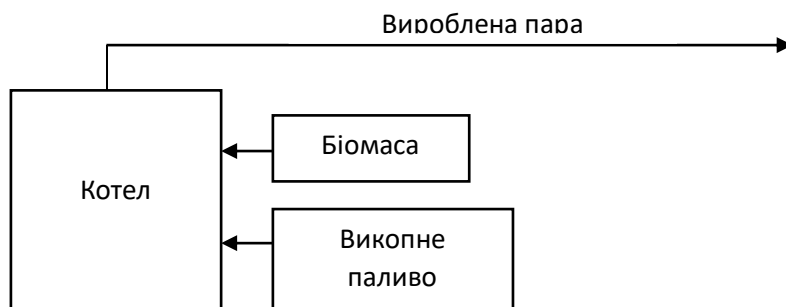


Рисунок 1.4 – Спільне пряме спалювання вугілля та біомаси¹⁵.

2. Непряме спільне спалювання

Біомаса спочатку газифікується, а паливний газ потім спалюється в основному котлі. Іноді газ потрібно охолоджувати та очищати, що складніше та передбачає вищі експлуатаційні витрати. Однак цей підхід забезпечує високу гнучкість використання палива. Ця система застосовується на деяких станціях в Австрії, Фінляндії та Нідерландах. Оскільки газифікація відбувається окремо, зола від вугілля та біомаси також збираються окремо. Також це дає змогу використовувати більше видів біомаси, оскільки потенційні проблеми, пов'язані із хімічним складом біомаси та її фізичними властивостями, вирішуються до того, як газифіковане паливо потрапить в основну камеру згоряння, таким чином, зберігаючи ефективність котла.

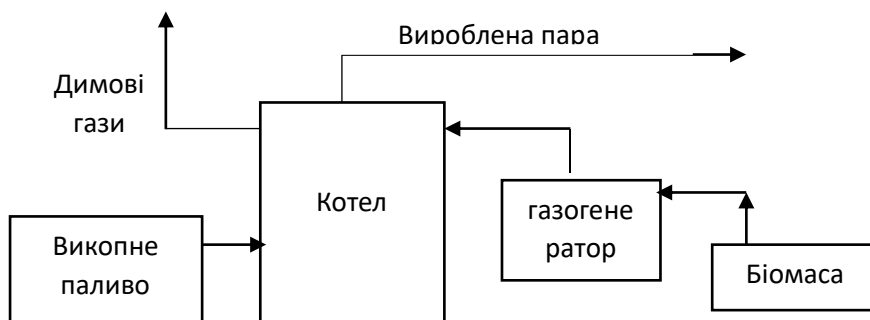


Рисунок 1.5 - Схема непрямого спільного спалювання біомаси та вугілля (з газогенератором)¹⁵

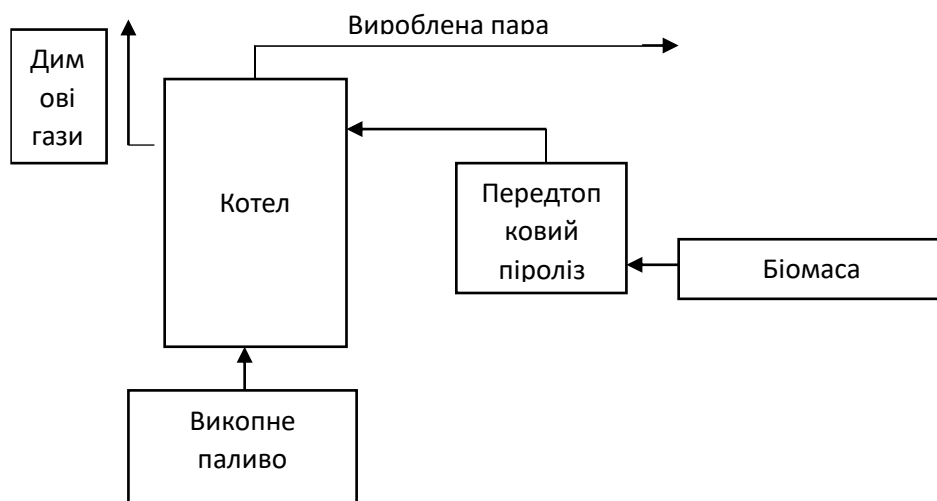


Рисунок 1.6 - Схема непрямого спільного спалювання біомаси та вугілля (з передтопковим піролізом)¹⁵

3. Паралельне спільне спалювання

Біомаса спалюється в окремому котлі, для виробництва пари. Пара використовується на електростанції разом із парою основного палива. Паралельне спільне спалювання є найбільш популярним для спалювання біомаси целюлозно-паперовій промисловості, оскільки для кори а відходів деревини використовують спеціальні котли на біомасі. Ці галузі економлять і підвищують свою енергоефективність за рахунок використання біовідходів і побічних продуктів основного виробництва паперу.

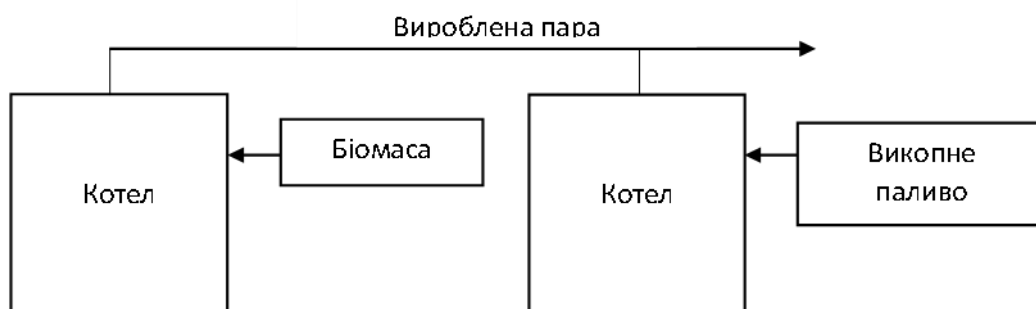


Рисунок 1.7 - Схема паралельного спалювання палива¹⁵

Технологій спалювання

1. Атмосферні камери згоряння з киплячим шаром

Ця технологія базується на псевдозрідженому русі палива і повітря. Це усталена комерційна технологія для установок спільного спалювання вугілля. Камера згоряння має шар, зазвичай виготовлений з піску, який створює середовище для підтримки високих температур згоряння, незважаючи на можливі домішки, у нашому випадку – домішки біопалива, - низький вміст енергії або високий вміст вологи в паливі, що вноситься. Таким чином, технологія підходить для палива різної якості та вологості, в тому числі, деревини та іншої біомаси. Усередині шару 90% шару складають пісок і зола, решта – паливо. Кількість викидів, при цьому, значно нижча, ніж у камері згоряння з ґратами, зокрема, викиди сульфато- та нітрогеновмісних сполук. Для переходу на пальне з біомаси потрібні великі інвестиції. Система АКЗКШ має кілька різновидів: циркуляційні, барботажні, та стаціонарні котли з киплячим шаром є найпоширенішими типами цієї технології.

2. Камера згоряння під тиском із псевдорозрідженим шаром

Має такий самий принцип роботи, як і атмосферні камери, проте горіння відбувається під тиском, вищим за атмосферний. Тому виникає проблема перетину вугільного палива та біомаси через граничний тиск у реакторі.

3. Пульверизований комбустер

Ця технологія залежить від попередньої обробки палива, вугілля та біомаси, у тонкий матеріал (менше 1 мм), готовий до внесення у пальник. Не дивлячись на обмеженість видів палива, які можна використовувати, ця технологія виробництва електроенергії все ще являється найпоширенішою для комунальних підприємств. Зниження викидів є однією з основних причин вибору цієї технології, але низька щільність енергії означає більший об'ємний потік до котла та можливість використання локально доступної біомаси.

Існує кілька способів використання біомаси для виробництва енергії за такою технологією:

- Спеціальні пальники на біомасі, окремо від пальників на вугіллі;
- Змішування підготовленого біопалива до вугілля перед спалюванням;
- Попереднє підмішування біомаси до вугілля на вуглезбагачувальній установці.

4. У камері згоряння

Паливо спалюється безпосередньо над решіткою без подальших процесів або циркуляції повітря. Це найпростіша і найстаріша конструкція для спалювання твердого палива із всіх зазначених. Оскільки конструкція не нова, вона є найменш ефективною та має високі показники викидів. Температури згоряння в такій камері вище, ніж для інших технологій, і коливаються від 800 до 1400 °С. Деревне паливо можна використовувати для сумісного спалювання у такій камері, але для інших видів біомаси, цей спосіб, як правило, не є придатним, оскільки спостерігаються проблеми повноти згоряння біомаси⁵).

Економіка, використання та стандарти деревних пелет у Європі

На даний момент, ринок деревних пелет є одним із найбільш розвинутих секторів виробництва біопродуктів у Європі.

У 2014 році країни-члени ЄС спожили 23 млн. тонн пелет, а до 2020 року, ця цифра зросла до 80 млн. тонн⁵.

Найбільшими виробниками, споживачами та експортерами пелетів у Європі є Швеція, Італія та Данія. Ціна на пелети, на відміну від ціни на викопні види палива, є відносно стабільною і коливається від 170 до 200 євро/тонну (при оптовому замовленні) залежно від країни.

Саме виробництво пелетів також потребує затрат енергії. Виробництво, яке включає всі етапи від отримання сировини до пакування) зазвичай потребує 80-150 кВт-год/т електроенергії, та близько 950 кВт-год тепла на тону випаровуваної води⁵.

Точна потреба залежить від багатьох факторів: точного розміру вхідних часточок, вмісту вологи використовуваної технології та масштабу виробництва.

Стандартизація є ключовим питанням для гарантування якості продукції та завоювання довіри ринку. Оскільки існує різна якість палива, потрібно вибирати такий вид палива, який найкраще підходить для певного типу установок. Нехтування такими даними може призвести до втрати ефективності, порушити процес горіння, або ускладнити технічне обслуговування приладу.

На сьогодні, найкращими вважаються пелети, сертифікату Enplus. Enplus – це всесвітня схема сертифікації, яка гарантує якість пелет, та їх контрольна кожному етапі виробництва.

Наведені нижче параметри є частиною технічних вимог, які встановлюються для пелетів при сертифікації Enplus

- Зольність – чим менша зольність, тим менших відхід залишатиме пелет, фі тим більшу кількість енергії він може дати. Низький вміст золи зменшує потребу у регулярній чистці обладнання.
- Температура плавлення золи – зола, що має низьку температуру плавлення, має тенденцію плавитися в найгарячіших частинах камери згорання та затвердівати, покидаючи ці зони. Цей твердий попіл, більш відомий як шлак, може зменшувати тепловіддачу, та збільшувати витрати на технічне обслуговування.
- Довжина, діаметр та об'ємна щільність – наявність пелет постійної довжини, діаметру та щільності є важливим, оскільки котли на деревних пелетах розроблені для використання пелетів зі стандартною енергетичною щільністю. Використання гранул неправильного розміру може вплинути на кількість вихідної енергії.
- Теплопровідна здатність та вміст вологи – нижня теплопровідна здатність (НТЗ), виражена в kWh/kg , відображає енергетичний вміст пелет. Вміст води відображає кількість води у відсотках, що міститься у пелетах. Чим нижчий

відсоток, чти вище тепловіддача на кг. Зазвичай НТЗ коливається від 4,6 до 5,1 кВт-год/кг.

- Механічна міцність – відображає стійкість гранул до ударів. Висока механічна міцність означає, що гранули менш схильні до руйнування під час транспортування та в шнеках подачі палива, таким чином, зберігаючи вид гранул та зменшуючи пил.
- Вміст азоту, сірки та хлору – ці параметри впливатимуть на кінцевий викид та корозію нагрівальних приладів.
- Важкі метали – впливатимуть на вміст викидів, поведінку пелетів при горінні та вмісті золи в них.

Більше параметрів деревних гранул за вимогами різних сертифікатів країн Європи наведено в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – показники якості паливних деревних гранул за вимогами сертифікатів країн Європи⁵

Параметр	DIN 51 731, ФРН	O-Norm M, 7135, Австрія	DIN Plus ФРН	SS 187120 Швеція	EN plus-A1	EN plus-A2
Діаметр, мм	4-10	4-10	4-10	Менше 25	5-7	5-7
Довжина, мм	менше 50	менше 50	менше 50	менше 50	3,15-40	3,15-40
Щільність, кг/дм ³	Більше 1,0-1,4	Більше 1,12	Більше 1,12	Не має	Менше 10	Менше 10
Вологість, %	Менше 12	Менше 10	Менше 10	Менше 10	Більше 600	Більше 600
Насипна маса, кг/м ³	650	650	650	Більше 500	Менше 1	Менше 1
Брикетний пил, %	Не має	Менше 2,3%	Менше 2,3	Не має	Менше 0,7	Менше 1,0
Зольність, %	Менше 1,5	Менше 0,5	Менше 0,5	Менше 1,5	Більше 16,5	Більше 16,5
Теплота згорання, МДж/кг	17,5-19,5	Більше 18	Більше 18	Більше 16,9	Більше 1200	Більше 1100

Закінчення таблиці 1.9

Параметр	DIN 51 731, ФРН	O-Norm M, 7135, Австрія	DIN Plus ФРН	SS 187120 Швеція	EN plus-A1	EN plus-A2
Температура плавлення золи, °C	Не має	Не має	Не має	Не має	Менше 0,05	Менше 0,05
Вміст сірки, %	Менше 0,08	Менше 0,04	Менше 0,04	Менше 0,08	Менше 0,3	Менше 0,3
Вміст азоту, %	Менше 0,3	Менше 0,3	Менше 0,3	Не має	Менше 0,02	Менше 0,03
Вміст хлору, %	Менше 0,03	Менше 0,02	Менше 0,02	Менше 0,03	Менше 1	Менше 1
Миш'як, мг/кг	Менше 0,8	Не має	Менше 0,8	Не має	Менше 10	Менше 10
Свинець, мг/кг	Менше 10	Не має	Менше 10	Не має	Менше 10	Менше 10
Хром, мг/кг	Менше 8	Не має	Менше 8	Не має	Менше 10	Менше 10
Мідь, мг/кг	Менше 5	Не має	Менше 5	Не має	Менше 10	Менше 10
Цинк, мг/кг	Менше 100	Не має	Менше 100	Не має	Менше 100	Менше 100
Ртуть, мг/кг	Менше 0,05	Не має	Менше 0,05	Не має	Менше 0,1	Менше 0,1
Кадмій, мг/кг	Менше 0,5	Не має	Менше 0,5	Не має	Менше 0,5	Менше 0,5
Нікель, мг/кг	Не має	Не має	Не має	Не має	Менше 10	Менше 10
Закріплювач, %	Не має	Менше 2	Менше 2	Не має	Не має	Не має
<ul style="list-style-type: none"> • Не має – означає що відомості відсутні, значення не визначене або їх величина та ін., 						

На сьогоднішній день лише невелика кількість європейських країн – Австрія, Швеція та Німеччина - мають офіційні стандарти для брикетованого палива з біомаси. У таких країнах як Франція та Великобританія, учасники ринку можуть самостійно підписатися на виконання певних стандартів щодо виготовленні пелетів. Інші країни,

які активно використовують тверде біопаливо, такі як Данія та Фінляндія, сподіваються використовувати європейський стандарт на пелети, який розробляється у рамках європейського стандарту на тверде біопаливо CEN/TC 335.

Пелети зазвичай зберігають у закритих приміщеннях або силосах. За своєю формою пелети є текучим паливом, яке можна транспортувати так само, як і рідини: пелети можна доставляти цистернами та закачувати в пелетний бак за допомогою насосів та шлангів. Потім з паливного бака вони можуть автоматично подаватися на спалювальні установки.

За даними порталу EUBia (European Biomass Industry Association)¹⁴, який подає актуальні дані щодо проектів виробництва електроенергії на біопаливі а також при спільному спалюванні біомаси та вугілля, в ЄС на сьогодні знаходяться в експлуатації більше 100 ТЕС, які використовують технології сумісного спалювання.

1.5 Методи очищення викидів ТЕС та використання вторинної сировини

1.5.1 Методи очистки викидів ТЕС

На сьогодні існує багато методів ефективного очищення газопилових викидів від ТЕС. Кожен з них використовується в залежності від різних факторів: кількості викиду, концентрації у ньому певного виду забрудника, тощо. Згідно до Плану заходів для скорочення викидів забруднюючих речовин від вугільних великих спалювальних установок, включених до Національного плану скорочення викидів, запропоновано такі методи очищення газопилових викидів:

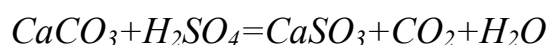
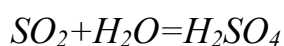
- Тканинні фільтри - використовуються для очищення великих об'ємів газопилових викидів. Зазвичай використовують рукавні фільтри. По формі вони подібні до рукавів. Потік забрудненого повітря подається до середини рукава. Завдяки властивостям тканини, очищення повітря проходить крізь неї, а забруднюючі часточки осідають на поверхні рукавів. Після, їх збирають струшуванням. Тканина, що використовується в таких фільтрах має бути повинна бути стійкою та довговічною, та при цьому мати

низьку гігроскопічність, добре фільтрувати газопиловий потік, та забезпечувати достатню швидкість та якість фільтрації. Зазвичай використовують тканини з бавовни та вовни, синтетичні (нітрон, лавсан) а також тканини зі скловолокна.



Рисунок 1. 8– тканинний рукавний фільтр²

- Мокре сіркоочищення – відбувається у вологих скруберах. Такий метод здатний забезпечити високу ефективність очищення газів від сірковмісних сполук. Принцип роботи вологих скрубєрів полягає у осаджуванні часточок пилу за допомогою крапельного розпилення воли та сорбенту. Сірковмісні сполуки видаляються в процесі реакції з сорбентом. Зазвичай у якості абсорбенту використовують вапняк через його дешевизну. Також вихідний продукт – гіпс – можливо продати. Процес перетворення можна прослідкувати через наступні хімічні реакції:



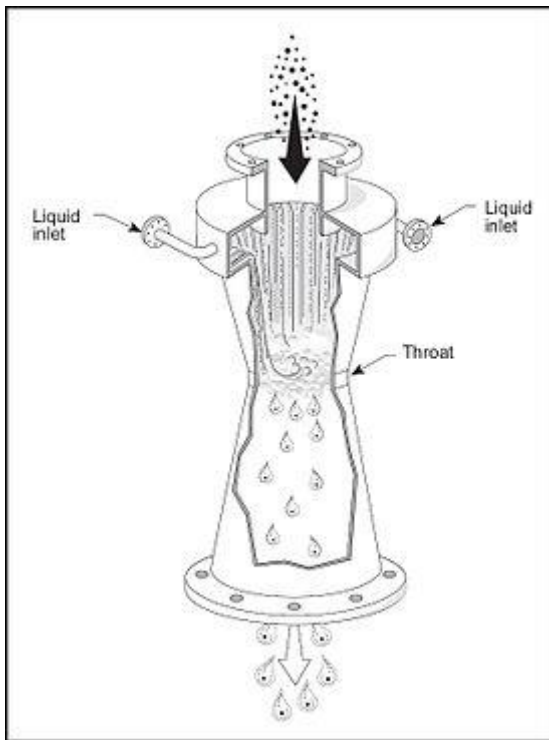
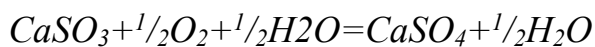
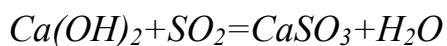


Рисунок 1.9 – Скрубер Вентурі ²

- Напівсуха десульфуризація- зазвичай використовують для малих та середніх котлів, а також для вугілля з невисоким вмістом сірки (до 1,5%). Принцип методу схожий з мокрим очищенням, однак перед подачею, вапно заздалегіть змішується з водою для отримання гашеного вапна ($Ca(OH)_2$). Його розпилюють у абсорбенті, далі відбувається реакцій зі сірковмісними сполуками та вода випарюється за високої температури газів:



- Селективне некаталітичне відновлення –концептуально простий процес відновлення оксидів азоту, який полягає в подачі та перемішуванні відповідного хімічного реагенту у потік димових газів, що містить оксиди азоту при температурі димових газів 850...1175 °С. В наслідок протікання швидкої газофазної реакції в присутності надлишку кисню, який як правило присутній в топці котла, реагент селективно відновлює оксид азоту залишаючи концентрацію кисню не змінною. Метод СНКВ привабливий через

його простоту, не потребує дорогих каталізаторів, легко встановлюється на діючому обладнанні, може бути застосований на всіх типах стаціонарних котлів.

- Селективне каталітичне відновлення - використовується для очищення газопилового викиду від оксидів азоту. Метод полягає в використанні відновника (як правило, аміаку), що вступає в реакцію з NO_x . В результаті реакції утворюються нешкідливі продукти – азот та вода.
- Електрофільтр – найчастіше використовується та має високий ступінь очищення (до 99%). Робота електрофільтра полягає у очищенні газів від твердих частинок під дією електричних сил. Часочки золи електризуються та осаджуються на електродах. Далі часточки струшують до бункеру з пилом².

1.5.2. Використання вугільних відходів як вторинної сировини

Деякі відходи спалювання вугілля можна використовувати повторно.

Використання вугільних відходів як вторинних ресурсів допоможе вугільним підприємствам вирішити одразу дві проблеми. По-перше, утилізація відходів сприятиме зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. По-друге, переробка та реалізація вугільних відходів принесе підприємству додатковий економічний ефект, впровадження цього напряму зможе вивести вугільні підприємства на новий рівень розвитку.

Одним із нових методів використання зольних залишків від спалювання вугілля є утилізація териконів. Породи відвалів та териконів можна використати для того, щоб отримати глинозем, з якого виплавляють алюміній, і розглянути його як нову нетрадиційну сировину. Таку сировину можна виставляти на продаж, що допоможе підприємствам не тільки розширити свою діяльність у напрямку покращення екології, а й має економічну вигоду. Для того, щоб отримати алюміній, можна перейняти досвід Франції. У цій країні було успішно випробувано новий метод переробки вугільних відходів для отримання глинозему. У Польщі технологи довели можливість

промислового отримання глинозему з глинистих порід, що містять близько 25% глинистих сланців⁷.

Вугільна зола є гарною основою для багатьох будівельних матеріалів.

Техніко-економічні розрахунки показують, що використання золошлакових відходів ТЕС у виробництві бетонних і залізобетонних виробів дозволяє:

- скоротити витрату цементу на 10-20 %;
- поліпшити фізико-механічні властивості бетонів;
- скоротити витрати на створення та експлуатацію відвалів;
- вивільнити землі, зайняті під відвали;
- виключити забруднення повітряного і водного басейнів.

Використання процесів гідратації портландцементу з добавкою 40 % золи виносу ТЕС довело доцільність заміни в бетонах значної частини клінкерного компонента. Підвищений вміст золи ТЕС у важких бетонах (у кількості 200 кг/м³), як показали дослідження і заводський досвід, дозволяє скоротити витрату портландцементу до 100 кг на 1 м³бетону (до 25 %), підвищити якість виробів.

Пористі заповнювачі з відходів ТЕС

Початковою сировиною для виробництва зольного гравію служать золи ТЕС, які видаляються не тільки сухим золовідбором, але й системою гідровидалення, зокрема відвальні золошлакові суміші (ЗШС). Вміст у золі незгорілих частинок має бути, не більше 10 %. Якщо їх кількість більше, технологія ускладнюється. Вміст у золі тривалентного заліза Fe_2O_3 повинно бути не менше 7 %, а оксидів кальцію і магнію - не більше 8 %⁷.

Будівельні розчини з застосуванням золи ТЕС

Передбачається можливість введення до складу будівельних розчинів від 20% тонкодисперсної летючої золи ТЕС з метою економії портландцементу високих марок. У даному випадку золі відводиться роль мінерального мікрозаповнювача

цементу, який сприяє збільшенню пластичності розчинів. Досліджено можливість застосування в розчинах кладок ЗШС одночасно і як тонкодисперсної добавки, і як дрібнозернистого заповнювача.

В'яжуче на основі золи та шлаків ТЭС

До високоефективних будівельних матеріалів, при виробництві яких можливо використовувати великотоннажні відходи промисловості, як відомо, відноситься шлаколужне в'яжуче. Основною сировиною для виробництва цих в'яжучих є металургійні шлаки. Паливні шлаки і золи в цій якості використовуються мало. Це пояснюється, перш за все, їх низькою основністю і уповільненою швидкістю набору міцності. Однак якщо врахувати, що ЗШС є у всіх районах країни і накопичення їх у відвалах рік від року зростає, то необхідність використання цих відходів для виробництва місцевих в'яжучих стає очевидним. Крім цього, розробка складу і технологій отримання шлаколужного в'яжучого на основі золошлакової суміші зробить свій внесок і у вирішенні проблеми забруднення навколишнього середовища.

Бетони на основі золи

Досвід роботи заводів ряду країн показав, що економічно доцільно вводити золу до складу звичайного бетону. Дослідникам давно відомо, що при заміні частини цементу золою поліпшується зручність вкладення бетонної суміші. Це відбувається, головним чином, за рахунок гладкої поверхні і сферичної форми зольних частинок. Чим дрібніша зола тим більша кількість цих частинок. Відповідно з цим зменшується і кількість води для отримання необхідної консистенції бетонної суміші і поліпшуються її показники: підвищується пластичність, однорідність і щільність бетонної суміші. Зола дозволяє поліпшити гранулометрію піску, в якому відсутні дрібні фракції. Особливо доцільно її додавати в тяжко обробні бетонні суміші з малою кількістю цементу.

Обсяг викидів забруднюючих речовин від породних відвалів складає близько 70 тис. т на рік, у тому числі окислів вуглецю – 38 тис. т, твердих частинок (у тому числі вуглепородного пилу) – понад 14 тис. т, окислів азоту – понад 5 тис. т⁷.

У зв'язку з тим, що на українських вугільних підприємствах зберігається велика кількість вугільного відсіву, пилу та неякісного вугілля, наступним ефективним методом утилізації вугільних відходів може стати брикетування вугілля – процес механічної переробки вугільних дрібниць в кускове паливо – брикети. Даний спосіб передбачає використання передового напрямку у сфері брикетування – способу екструзійного векторного впливу. Використання цієї технології дозволяє виробляти паливні брикети з питомими витратами електроенергії на формування не більше 1,5–2 *кВт/т*. Використання методу брикетування українськими вугільними підприємствами є доцільним, адже капітальні витрати на це виробництво мінімальні порівняно з іншими можливими методами переробки вугільних відходів; брикетоване вугілля продовжує набирати попит; за площею та кількістю працівників процес брикетування найбільш оптимальний, а продуктивність дуже висока.

Вугільні брикети можна застосовувати для металургійних, хімічних підприємств, для побутових потреб населення та як енергетичну сировину на електростанціях. Таким чином, використання вугільних відходів у процесі брикетування допоможе економити енергетичні та сировинні ресурси, зменшить негативний вплив на навколишнє середовище, за рахунок рентабельної роботи брикетних виробництв покращить фінансовий стан вугледобувних підприємств. Загальну схему способів використання вугільних відходів у якості вторинної сировини наведено на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 - Загальна схема способів використання вугільних відходів у якості вторинної сировини⁷.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ, РОЗРАХУНКИ ТА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ ДАНИХ

2.1 Метод дослідження

Дослідження проведено у вигляді математичного розрахунку кількості викидів на ТЕС потужністю 300 МВт у трьох випадках:

1. При використанні вугілля у якості палива та відсутності очисного обладнання
2. При використанні вугілля у якості палива та присутності очисного обладнання
3. При використанні вугілля з домішкою твердого біопалива у розмірі 10%

Методику розрахунку взято відповідно до УДК 662.611:66.074.3 «Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення»¹⁰, яка враховує вимоги щодо очищення викидів від великих спалювальних установок відповідно до Директиви 2010/75/ЄС²¹ та Національного плану скорочення викидів¹² відповідно.

Розрахунок викиду речовин у вигляді твердих часточок

Показники емісії речовини що виходить у вигляді суспензованих твердих частинок визначається як специфічний і розраховується за формулою:

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} \left(a_{\text{ВИН}} \frac{A^r}{100} + \frac{q_4}{100} \cdot \frac{Q_i^r}{Q_C} \right) (1 - \eta_{\text{ЗУ}}) + k_{\text{ТВS}} \quad (2.1)$$

де $k_{\text{ТВ}}$ - показник емісії твердих частинок, г/ГДж;

Q_i^r - нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

A^r - масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

$a_{вин}$ - частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

Q_C - теплота згоряння вуглецю до CO_2 , яка дорівнює 32,68 МДж/кг;

q_4 - втрати тепла, пов'язані з механічним недопалом палива, %;

$\eta_{зу}$ - ефективність очищення димових газів від твердих частинок;

Вміст золи A^r в паливі та горючих речовинах визначається в результаті проведення досліджень палива та рідкої золи, яка виходить в результаті роботи спалювальної установки.

Зола виходить зі спалювальної установки у вигляді виносу (леткої золи) або шлаку. Частка золи, яка виходить у вигляді виносу, визначається значенням $a_{вин}$ та специфічна в залежності від методу спалювання палива. Показник визначається за даними згідно останніх випробувань установки для спалювання, або, у разі відсутності можливості отримання таких даних – за даними згідно «паспорту» даної установки, відповідно до типу спалюваного палива (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 — Частка леткої золи $a_{вин}$ при різних технологіях спалювання палива

Котел	Вугілля	Мазут
З твердим (сухим) шлаковидаленням	0,95	1,00
Відкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,80	1,00
Напіввідкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,70	1,00
Двокамерна топка:	0,55	1,00

- з вертикальним передтопком	0,30	1,00
горизонтальна циклонна	0,15	1,00
З циркулюючим киплячим шаром	0,50	–
З бульбашковим киплячим шаром	0,20	–
З нерухомим шаром	0,15	–

Значення η_{zy} визначається за результатами роботи золоуловлювальної установки або за її паспортними даними. Ефективність установки визначається за формулою:

$$\eta_{zy} = 1 - \frac{m_1}{m_2} \quad (2.2)$$

m_1 – масова концентрація золи до пиловловлювальної установки;

m_2 - масова концентрація золи після золовловлювальної установки.

У випадку відсутності такої установки, η_{zy} буде дорівнювати нулю.

Для зв'язування оксидів в топці котла (наприклад, за технологіями спалювання палива в киплячому шарі) можуть використовуватись сорбенти. У результаті реакції можуть утворюватися тверді частинки сульфату та сульфіту, а також невикористаного сорбенту. Показник емісії твердих частинок невикористаного в енергетичній установці сорбенту та утворених сульфатів і сульфітів $k_{мсS}$, г/ГДж, розраховується за формулою:

$$k_{твS} = \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \frac{S^r}{100} \left[\eta_I \frac{\mu_{прод}}{\mu_S} + (m - \eta_I) \frac{\mu_{сорб}}{\mu_S} \right] a_{вин} (1 - \eta_{zy}) \quad (2.3)$$

де Q_i^r - нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

S^r -масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

$a_{вин}$ - частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

$\mu_{прод}$ -молекулярна маса твердого продукту взаємодії сорбенту та оксидів сірки, кг/кмоль;

$\mu_{сорб}$ - молекулярна маса сорбенту (оксиди мангану та алюмінію), кг/кмоль;

μ_S -молекулярна маса сірки, яка дорівнює 32 кг/кмоль;

m - мольне відношення активного хімічного елементу сорбенту та сірки (таблиця 2.2);

η_I - ефективність зв'язування сірки сорбентом у топці або при застосуванні сухих та напівсухих методів десульфуризації димових газів (таблиці 2.2 та 2.3)

$\eta_{зу}$ - ефективність очистки димових газів від твердих частинок.

Таблиця 2.2 - Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у топці

Технологія спалювання	η_I	Примітка
Факельне спалювання вугілля в котлах з рідким шлаковидаленням	0,05	Зв'язування золою палива
Факельне спалювання вугілля в котлах з твердим шлаковидаленням	0,10	Те саме
Факельне спалювання мазуту в котлах	0,02	“

Закінчення таблиці 2.2

Технологія спалювання	η_1	Примітка
Спалювання в киплячому шарі	0,95	Зв'язування сорбентом у котлі при мольному відношенні $Ca/S m = 2,5$

Вміст діоксиду сірки SO_2

Показник емісії k_{SO_2} г/ГДж оксидів сірки. Визначається для SO_2 та SO_3 у перерахунку на діоксид сірки SO_2 , які надходять у атмосферу із газами, та розраховуються за формулою:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_1)(1 - \eta_{II}\beta) \quad (2.4)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

S^r – вміст сірки в паливі на робочу масу за проміжок часу P , %;

η_1 – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом у енергетичній установці;

η_{II} – ефективність очистки димових газів від оксидів сірки;

β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Масовий вміст сірки в робочій масі потрібно визначати під час технічного аналізу згідно ГОСТ 27313-95 (ISO 1170-77).

В випадку відсутності отримання експериментальних даних, приймають «паспортні» значення вмісту сірки для різних видів і марок палива (таблиці 2.3.).

Таблиця 2.3 - Масовий вміст сірки у різних видах палива

Вугілля	$S^{daf}, \%$
Антрацитовий штиб АШ	2,4
Пісне вугілля ТР	3,3
Донецьке газове ГР	4,4
Донецьке довгополуменеве ДР	4,3
Львівсько-волинське (ЛВ) ГР	3,7
Олександрійське буре БІР	5,9

Оксиди азоту NO_x

При спалюванні органічного палива утворюються оксиди та діоксиди азоту, кількість викиду яких визначають в перерахунку на NO_2 .

Показник емісії оксидів азоту k_{NO_x} , г/ГДж розраховується за формулою:

$$k_{NO_x} = (k_{NO_x})_0 f_n (1 - \eta_I) (1 - \eta_{II} \beta) \quad (2.5)$$

де $(k_{NO_x})_0$ - показник емісії оксидів азоту без урахування заходів скорочення викиду, г/ГДж;

f_n - ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні;

η_I - ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викиду;

η_{II} - ефективність вторинних заходів (азотоочисної установки);

β - коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

Узагальнені значення показників емісії оксидів при спалюванні органічного палива за різними технологіями без урахування очисного обладнання для скорочення викиду сполук азоту визначають згідно таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Показник емісії оксидів азоту без урахування первинних заходів, г/ГДж

Технологія спалювання	Тверде паливо	Мазут	Газотурбінне паливо	Природний газ
Факельне спалювання:				
Теплова потужність котла ≥ 300 МВт:	–	200	–	150
з рідким шлаковидаленням при спалюванні антрациту	420	–	–	–
з рідким шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	250	–	–	–
з твердим шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	230	–	–	–

При роботі установки на низькому навантаженні, зменшується температура горіння палива, завдяки чому кількість викиду оксидів азоту значно скорочується.

Ступінь зменшення викиду оксидів азоту розраховується за формулою

$$f_n = (Q_\phi / Q_n)^z \quad (2.6)$$

де f_n - ступінь зменшення викиду оксидів азоту під час роботи на низькому навантаженні;

Q_ϕ - фактична теплова потужність енергетичної установки, *MВт*;

Q_n - номінальна теплова потужність енергетичної установки, *MВт*;

z - емпіричний коефіцієнт, який залежить від виду енергетичної установки, її потужності, типу палива тощо.

Теплову потужність парового котла Q можна визначити, знаючи продуктивність парового котла (D), за допомогою таблиці 2.5.

Таблиця 2.5– Продуктивність парового котла в залежності від обладнання

Обладнання	Значення
Котел з тиском свіжої пари p_0 (13,8 МПа (при $D_0 \leq 500$ т/год) з проміжним перегрівом	1,35
Котел з тиском пари в межах: $9,8 \text{ МПа} \leq p_0 \leq 13,8 \text{ МПа}$ (при $D_0 < 500$ т/год) без проміжного перегріву	1,45
Котел з тиском пари в межах: $1,4 \text{ МПа} < p_0 < 9,8 \text{ МПа}$ (при $D_0 = 6,5 \dots 75$ т/год для перегрітої пари) без проміжного перегріву	1,35
Котел з тиском пари $p_0 \leq 1,4 \text{ МПа}$ (при $D_0 \leq 20$ т/год для насиченої пари) без проміжного перегріву	1,50

Емпіричний коефіцієнт z визначає при випробуванні установки, або визначається за таблицею 2.6.

Таблиця 2.6 - Значення емпіричного коефіцієнта z

Теплова потужність (паропродуктивність) котельної установки	Тверде паливо	Природний газ, мазут
Паровий котел 140 МВт і вище (200 т/год і вище)	1,15	1,25
Паровий котел від 22 до 140 МВт (від 30 до 200 т/год)	1,15	1,25
Водогрійний котел	1,15	1,25

Первинні (режимо-технологічні) заходи спрямовано на зменшення утворення оксидів азоту в топці або камері згоряння енергетичної установки. До цих заходів відносяться: використання малотоксичних пальників, ступенева подача повітря та палива, рециркуляція димових газів тощо. Значення ефективності застосування первинних заходів η_i , окремих та їх комбінацій, визначаються за результатами випробувань енергетичної установки після їх впровадження і затверджуються відповідними актами. У випадку відсутності такої можливості та для проведення попереднього розрахунку використовують орієнтовні значення (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 - Ефективність первинних заходів η_i скорочення викиду NO_x .

Тип первинних заходів	Ефективність η_i
Малотоксичні пальники	0,20
Ступенева подача повітря	0,30
Подача третинного повітря	0,20
Рециркуляція димових газів	0,10
Трьохступенева подача повітря та палива	0,35
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря	0,45
Малотоксичні пальники + подача третинного повітря	0,40
Малотоксичні пальники + рециркуляція димових газів	0,30
Ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,45

Закінчення таблиці 2.7

Тип первинних заходів	Ефективність η_I
Ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,40
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,50
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,60

За неможливості досягти за допомогою первинних заходів допустимої концентрації оксидів азоту в димових газах для їх очищення від NO_x використовують азотоочисну установку. Значення ефективності η_{II} та коефіцієнта роботи азотоочисної установки (відношення часу роботи азотоочисної установки до часу роботи енергетичної установки) визначаються під час випробувань, а за їх відсутності - згідно з таблицею 2.8.

Таблиця 2.8 — Ефективність та коефіцієнт роботи азотоочисної установки NO_x

Технологія очищення димових газів від NO_x	Ефективність η_{II}	Коефіцієнт роботи β
Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ)	0,50	0,99
Селективне каталітичне відновлення (СКВ)	0,80	0,99
Активоване вугілля	0,70	0,99
DESONOX – SNOX	0,95	0,99

Діоксид вуглецю CO_2

Діоксид вуглецю є основним газоподібним продуктом окиснення всіх органічних видів палива. Обсяг його викиду залежить від ступеня окиснення вуглецю палива в енергетичній установці та загального вмісту вуглецю та його сполук у паливі. Показники емісії діоксиду вуглецю k_{CO_2} , г/гДж при спалюванні органічного палива розраховується за формулою:

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_{ir}^r} \varepsilon_C = 3,67 k_C \varepsilon_C \quad (2.7)$$

де C^r - масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

Q_{ir} - нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

ε_C - ступінь окислення вуглецю палива

k_C - показник емісії вуглецю палива, г/ГДж.

Ступінь окиснення вуглецю палива визначається ефективністю процесу горіння. При повному згорянні палива ступінь окиснення дорівнює одиниці, але за наявності недогорання його показник значно зменшується. В енергетичних установках ступінь окислення вуглецю розраховується за формулою:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{A^r}{C^r} \left(a_{вин} \frac{\Gamma_{вин}}{100 - \Gamma_{вин}} + (1 - a_{вин}) \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} \right) \quad (2.8)$$

де A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

$a_{вин}$ – частка золи, яка видаляється у вигляді леткої золи;

$G_{вин}$ – масовий вміст горючих речовин у виносі твердих частинок, %;

$G_{шл}$ – масовий вміст горючих речовин у шлаку, %.

Для природного газу рекомендоване значення ε_C становить 0,995, для мазуту – 0,991.

Специфічний показник емісії вуглецю розраховується зі співвідношення вмісті вуглецю палива до його теплоти згоряння:

$$k_C = \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \quad (2.9)$$

де C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

Q_{ir} – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг.

За відсутності інформації щодо вмісту вуглецю в паливі та його теплоту згоряння необхідно користуватись узагальненим показником емісії вуглецю (таблиця 2.9).

Таблиця 2.9 - Показник емісії вуглецю палива k_C , г/ГДж

Паливо	Значення
Вугілля:	
Антрацит	28 160
Пісне	26 050
газове та довгополуменеве	25 180
Буре	25 630
Мазут	21 100
Природний газ	15 300

При спалюванні органічного палива може утворюватися також монооксид вуглецю, але при потраплянні в атмосферу він неодмінно перетворюється у діоксид вуглецю. Тому для при розрахунку показників емісії двоокису вуглецю, за вуглекислий газ вважають весь вуглецю палива, що утворився.

2.2 Дані для розрахунку

Оскільки у зв'язку з ситуацією в країні збір даних на пряму з ТЕС наразі неможливий, було використано опосередковані дані згідно методики розрахунку та доступні дані, щодо ТЕС потужністю 300 МВт, а також дані, надані відділом Прогнозування розвитку електроенергетичного комплексу Інституту загальної енергетики НАН України.

Дані для розрахунку наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Дані для проведення розрахунку

Показник та одиниці виміру	Значення			
	Фактичне (вугілля)	При встановленні очисного обладнання)	Вугілля 90% +10% біомаси	Для Біомаси
Q_i	23.6	23.6	22.3	22,3
q_4	4	4	3.8	3,8
A_r	24.7	24.7	23	23
Q_c	32.68	32.68	32.68	32.68
$a_{(вин)}$	0.8	0.8	0.8	0.8
$D_{зу}$	0	0.999	0	0,999
$\Gamma_{вин}$	1.5	1.5	1.5	1.5
η_I	0.05	0.05	0.05	0.05
η_{II}	0	0.96	0	0,96

Закінчення таблиці 2.10

Показник та одиниці виміру	Значення			
	Фактичне (вугілля)	При встановленні очисного обладнання)	Вугілля 90% +10% біомаси	Для Біомаси
z	1.15	1.15	1.15	1.15
$k_{(co)}$	11.4	11.4	11.4	11.4
β	0	0.99	0	0,99
S_r	2.4	2.4	2.2	2,2
$k_{(NOx)}\theta$	250	250	240	240
C_r	93.5	93.5	89	89
D	950	950	914	914
$D_1(NO)$	0.1	0.1	0.1	0.1
$D_2(NO)$	0	0.8	0	0,8
$B(NO)$	0	0.99	0	0,99
Q_ϕ	704	704	704	704
Q_H	563	563	563	563

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Основний розрахунок

Відповідно до методики розрахунку з розділу 2.1 та даних для розрахунку 2.2 було проведено наступні розрахунки:

1. Розрахунок вмісту твердих частинок (формули 2.1-2.3):

- Для вугілля

$$k_{\text{твS}} = \frac{10^6}{23,6} \cdot \frac{2,4}{100} \left[0,05 \frac{151}{32} + (2,5 - 0,05) \frac{87}{32} \right] 0,8 (1 - 0) = 5659,004$$

$$k_{\text{тв}} = \frac{10^6}{23,6} \left(0,8 \frac{24,7}{100} + \frac{4}{100} \cdot \frac{23,6}{32,68} \right) (1 - 0) + 5659,004 = 141159,4$$

- Вугілля та очисне обладнання

$$k_{\text{твS}} = \frac{10^6}{23,6} \cdot \frac{2,4}{100} \left[0,05 \frac{151}{32} + (2,5 - 0,05) \frac{87}{32} \right] 0,8 (1 - 0,99) = 245,35$$

$$k_{\text{тв}} = \frac{10^6}{23,6} \left(0,8 \frac{24,7}{100} + \frac{4}{100} \cdot \frac{23,6}{32,68} \right) (1 - 0,99) + 245,35 = 253,9$$

- Вугілля +10% біопалива

$$k_{\text{твS}} = \frac{10^6}{22,3} \cdot \frac{2,2}{100} \left[0,05 \frac{151}{32} + (2,5 - 0,05) \frac{87}{32} \right] 0,8 (1 - 0) = 5489,83$$

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{22,3} \left(0,8 \frac{23}{100} + \frac{3,8}{100} \cdot \frac{22,3}{32,68} \right) (1 - 0) + 5489,83 = 13866,6$$

- Вугілля + 10% біопалива + очисне обладнання

$$k_{\text{ТВS}} = \frac{10^6}{22,3} \cdot \frac{2,2}{100} \left[0,05 \frac{151}{32} + (2,5 - 0,05) \frac{87}{32} \right] 0,8 (1 - 0,99) = 311,6$$

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{22,3} \left(0,8 \frac{23}{100} + \frac{3,8}{100} \cdot \frac{22,3}{32,68} \right) (1 - 0,99) + 311,6 = 437,3$$

2. Розрахунок вмісту сірковмісних сполук (формула 2.4):

- Вугілля

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{23,6} \frac{2 * 2,4}{100} (1 - 0,05)(1 - 0) = 1932,20$$

- Вугілля + очисне обладнання

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{23,6} \frac{2 * 2,4}{100} (1 - 0,05)(1 - 0,96 * 0,99) = 95,84$$

- Вугілля + 10% біопалива

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{22,3} \frac{2 * 2,2}{100} (1 - 0,05)(1 - 0) = 1874,439$$

- Вугілля+ 10% біопалива + очисне обладнання

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{22,3} \frac{2 * 2,2}{100} (1 - 0,05)(1 - 0,96 * 0,99) = 92,97$$

3. Розрахунок викиду азотовмісних сполук (формули 2.5-2.6):

- Вугілля

$$f_H = (704/563)^{1,15} = 1,30$$

$$k_{\text{NO}_x} = 250 * 1,30 * (1 - 0,1)(1 - 0) = 290,9$$

- Вугілля + очисні установки

$$f_H = (704/563)^{1,15} = 1,30$$

$$k_{\text{NO}_x} = 250 * 1,30 * (1 - 0,1)(1 - 0,8 * 0,99) = 60,5$$

- Вугілля+ 10% біопалива

$$f_H = (704/563)^{1,15} = 1,30$$

$$k_{\text{NO}_x} = 240 * 1,30 * (1 - 0,1)(1 - 0) = 1874,439$$

- Вугілля +10% біопаливо + очисне обладнання

$$f_H = (704/563)^{1,15} = 1,30$$

$$k_{NOx} = 240 * 1.30 * (1 - 0,1)(1 - 0,8 * 0,99) = 92,98$$

4. Розрахунок викиду вуглецю (формули 2.7-2.9)

Національний план скорочення викидів не включає очищення від викидів вуглецю, однак розрахунок проведено, оскільки додавання біопалива передбачає зменшення показника цього викиду, та є однією з основних причин його безпосереднього використання.

- Вугілля

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{93,5}{100} \cdot \frac{10^6}{23,6} 0,978 = 142072,5$$

При встановленні установки селективного каталітичного відновлення з рециркуляцією димових газів та сіркоочисної установки, викид вуглецю не зміниться, та буде такий самий, як і при звичайному використанні вугілля.

- Вугілля + 10% біопаливо

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{89}{100} \cdot \frac{10^6}{22,3} 0,93 = 136094,2$$

Для вугілля з додаванням 10% біопалива а також встановленням очисного обладнання для вловлювання SO_2 , NO_x та завислих часточок дані результати обчислення будуть такі самі, як і для розрахунку «Вугілля + 10% біопалива».

Для зручності, всі отримані дані згруповано та містяться в таблиці 2.11.

Таблиця 3.1 – результати розрахунків щодо викидів ТЕС

Показник	Значення			
	Фактичне (вугілля)	При встановленні очисного обладнання	Вугілля +10% біомаси	Вугілля + 10% біомаси +очисне обладнання
Викид речовин у вигляді твердих часточок, г/ГДж	14159,4	253,9	13866,6	437,3
Викид SO_2 , г/ГДж	1932,20	95,84	1874,439	92,972
Викид NO_x , г/ГДж	290,9	60,5	279,3	58,1
Викид CO_2 , г/ГДж	142072,5	142072,5	136094,2	136094,2

Також було проведено приблизних розрахунків необхідної кількості палива виходячи з наступних показників теплової потужності: кам'яне вугілля – 7900-8600 ккал/кг, тверде біопаливо – 4000-4300 ккал/кг.

Сумарні розрахунки витрати палива склали:

- При використанні вугілля – 118631 кг/год
- При встановленні очисного обладнання – 118631 кг/год
- Вугілля + 10% біопалива – 119483 кг/год
- Вугілля+ 10% біопаливо +очисне обладнання - 119483 кг/год

3.2 Обробка результатів розрахунку

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що додавання певного відсотку біопалива до основної маси кам'яного вугілля сприяє зменшенню викидів при спалюванні. При наявності очисного обладнання, за рахунок використання біопалива, на нього відбувається менше навантаження, що зменшує зношуваність елементів очисного обладнання та зменшення об'єму кінцевого викиду забруднювачів. Також слід зазначити, що встановлення очисного обладнання відповідно до Директиви 2010/75/ЄС не передбачає очищення від викидів CO_2 , у той час як використання біопалива дозволяє зменшити викид діоксиду вуглецю.

Виходячи з існуючих технологій, що застосовуються на українських ТЕС, запровадження навіть таких змін потребує значних капіталовкладень на встановлення нового обладнання для попереднього подрібнення деревних пелет та окремих камер для спалювання, якщо цього буде потребувати обраний метод сумісного спалювання. Також може знадобитись реконструкція модернізація вже існуючих котлів, для покращення їх характеристик та збільшення кінцевого виходу енергії.

ВИСНОВКИ

1. Запаси вугілля в Україні та світі починають вичерпуватись. Продовження використання вугілля як основного палива у великих обсягах може призвести до нестачі сировини для отримання енергії. Крім того спалювання кам'яного вугілля продукує велику кількість викидів твердих часточок, SO_2 , NO_x та CO_2 .
2. Спільне спалювання вугілля та біомаси має великих потенціал для України, як аграрної країни, та є одним із оптимальних рішень зменшення викидів у тепловій енергетиці. Україна має запас твердого біопалива більш ніж 26 млрд $m^3/рік$
3. Розраховано кількість викидів від спалювальної установки для сумісного спалювання вугілля та біопалива потужністю до 300 МВт у чотирьох випадках: при спалюванні кам'яного вугілля, при спалюванні кам'яного вугілля та наявності очисного обладнання (селективне каталітичне відновлення з рециркуляцією димових газів та сіркоочисна установка), при спалюванні кам'яного вугілля з додаванням 10% біопалива, при спалюванні кам'яного вугілля з додаванням 10% твердого біопалива та наявністю очисного обладнання.
4. Додавання 10% твердого біопалива сприяє зменшенню викидів при спалюванні викопного палива на теплових електростанціях потужністю до 300 МВт, а саме: зменшення викидів твердих часточок зменшилось від 141159,4 $г/ГДж$ до 13866,6 $г/ГДж$ (2.1%), викид SO_2 – від 1932.20 $г/ГДж$ до 1874,439 $г/ГДж$ (3%), викид NO_x – від 488,8 $г/ГДж$ до 483,0 $г/ГДж$ (4%), викид CO_2 – від 142072.5 до 136094,2 $г/ГДж$ (4,2%).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гічов, Ю.О. *Теплові Електростанції та проблеми перетворення енергії. Частина 1: навчальний посібник* Дніпро НМетАУ, 2017, с. 59.
2. *Основи теплової енергетики: конспект лекцій навч. посіб. Для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А. В. Борисенко, В. А. Пешко; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021 , 149 с.*
3. Атаєв, С.В. Обґрунтування параметрів екологічно безпечної конструкції димової труби біопаливної ТЕС *Науковий журнал «Екологічна безпека»: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського* 2019 , 1, с. 7-13.
4. Гелетуха Г.Г. Перспективи використання біомаси від обрізків та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні/ Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Драгієв С.В., Баштовий А.І.//*Пром. Теплотехніка* , 2018 - №1, с.68-74.
5. Галиш; Н.А. Сертифікація деревних пелет як необхідна складова їх збуту *Економічний аналіз*, Тернопіль, 2018, 3, с.238-246.
6. Желєзна; Т.А. Баштовий; А.І. Аналіз основних тенденцій розвитку біоенергетики в Європейському союзі *Пром. Теплотехніка*, 2018, 3, с 70-75.
7. Крамчанінова; М.Д. Фот; В.О. Використання вторинних ресурсів як засіб забезпечення еколого-економічної ефективності вугільних підприємств *БізнесІнформ* 2018, 10, с 165-170.
8. Гелетуха; Г.Г. Жовмір; М.М. Олійник; Є.М. Радченко; С.В. Біомаса як паливна сировина *Пром.теплотехніка* 2011, 5, с 76-84
9. *Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні*. Звіт підготовлено в рамках проекту «Секретаріат та Експертний хаб з енергоефективності», що впроваджується Програмою розвитку ООН в Україні за підтримки Уряду Республіки Словачія та сприяння Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарств в Україні, березень 2017.

10. *Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок.*
Методика визначення УДК 662.611:66.074.3 ГКД 34.02.305—2002 чинний від 01.07.2002 року.
11. *Водний Кодекс України.* Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 24, 189 с.
12. *Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок,*
Кабінет Міністрів України від 8 листопада 2017 року, 60 с.
13. EMBER. Coal to clean technology www.ember-climate.org
14. EnergyMap www.map.ua-energy/org
15. European Biomass Industry Association <https://www.eubia.org/>
16. Orsted: renewable energy company that takes tangible action to create a world that runs entirely on green energy <https://orsted.com/>
17. Timber's Circular Economy. Australian Sustainable Hardwood (ASH) <https://ash.com.au/blog/timbers-circular-economy/>
18. Біогаз – реальна альтернатива природному газу. Агробізнес Сьогодні <http://agro-business.com.ua/agro/idei-trendy/item/8373-biohaz-realna-alternatyva-pryrodnomu-hazu.html>
19. Вугільні басейни світі <https://uk.wikipedia.org>
20. ДИРЕКТИВА 2009/28/ЄС Європейського Парламенту і Ради про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел <https://ips.ligazakon.net/document/MU09267>
21. ДИРЕКТИВА ЄВРОПЕЙСЬКОГО ПАРЛАМЕНТУ І РАДИ 2010/75/ЄС від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання забрудненню та його контролю) https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_004-10#Text
22. Житомирська ТЕЦ, що працює на відходах деревообробки. Укрформ: Мультимедійна платформа іномовлення України <https://www.ukrinform.ua/rubric-yakisne-zhyttia/3353762-u-zitomiri-pobuduvali-tec-so-pracue-na-vidhodah-derevoobrobki.html>

23. Зима «на мінімалках»: опалювальний сезон почався, проте енергетика не готова. Радіо Свобода <https://www.radiosvoboda.org/a/kryza-tes-aes-vugillya-rf-knr/31547004.html>
24. Ресурси і запаси вугілля <https://buklib.net/books/31650/>
25. У Львові та Житомирі планують побудувати ТЕЦ на біопаливі <https://www.the-village.com.ua/village/city/city-news/331181-u-lvovi-ta-zhitomiri-planuyut-pobuduvati-tets-na-biopalivi>